

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Michelle Matos de Souza

Uso do Georadar (GPR) em Investigações Ambientais

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador:
José Tavares Araruna Júnior

Rio de Janeiro,
Agosto de 2005



Michelle Matos de Souza

Uso do Georadar (GPR) em investigações ambientais

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Tavares Araruna Jr.

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Franklin dos Santos Antunes

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Eng. Cassiane Maria Ferreira Nunes

Co-Orientador

Petrobras

Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Profa. Maria Claudia Barbosa

COPPE/UFRJ

Prof. Lúcio Flávio de Souza Villar

UFMG

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial

do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 05 de agosto de 2005

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Michelle Matos de Souza

Engenheira Civil formada pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG – em abril de 2003.

Ficha Catalográfica

Souza, Michelle Matos de

Uso do Georadar (GPR) em investigações ambientais / Michelle Matos de Souza ; orientador: José Tavares Araruna Júnior. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

120 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Georadar. 3. GPR. 4. Radar de penetração. 5. Investigação ambiental. 6. Geofísica. I. Araruna Júnior, José Tavares. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia civil. III. Título.

Aos meus pais,
Miguel e Maria.

A minha irmã,
Giza.

Agradecimentos

Agradeço a todos que ajudaram na realização deste trabalho.

Professor Araruna, agradeço a orientação e a oportunidade desta dissertação.

Professor Franklin, pela dedicação fornecida e pela amizade conquistada. Seus conselhos foram essenciais para a minha formação.

Cassiane, pelos conhecimentos transmitidos que foram indispensáveis para a realização deste trabalho e, em especial pela amizade.

Professor Lúcio, meu grande amigo e incentivador. Obrigada por me incentivar a chegar até aqui e por estar presente numa hora tão importante.

Meus pais e Giza que sempre me apoiaram em todas as circunstâncias. O meu sincero agradecimento por todo amor e carinho.

Eder, existem sentimentos que são inenarráveis: Amor, amizade, companheirismo, cumplicidade, apoio, energia... Você é tudo isso e muito mais. Obrigada por existir e estar presente em minha vida.

Ana, a “irmandade” que conquistamos ficará gravada em nossos corações. Você foi minha família nas horas mais difíceis. Valeu negona!

Nelly, Luciana e irmã Graça, vocês foram além de grandes amigas, grandes psicólogas. Incentivaram-me e me deram força nas horas de cansaço e desilusão. Obrigada amigas!

Cyntia, Emiliana, Joabson, Sabrina, Patrício, Flávio, Júlio, Fábio, amigos da PUC, que estiveram presentes durante a realização desta dissertação. Obrigada pelas longas conversas, festas e pelos bons momentos.

Minha família e amigas de BH, que sempre me deram a maior força e nunca deixaram de estar aqui comigo, mesmo que seja no coração, vai aí o meu Muito Obrigada!

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Mecânica dos Solos e Meio Ambiente. Obrigada Willian, “Seu” José, Amaury e Josué pelo apoio em laboratório e em campo.

Agradeço ao pessoal da secretaria do departamento de engenharia civil. Em especial à Ana Roxo, por nos ter acolhido como filhas e filhos.

As empresas que permitiram a execução e a divulgação desta pesquisa.

A CAPES, ANP e PRONEX pelo apoio financeiro.

Resumo

Souza, Michelle Matos; Araruna, José Tavares. **Uso do Georadar (GPR) em Investigações Ambientais**. Rio de Janeiro, 2005. 120p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar as potencialidades do método GPR (*Ground Penetrating Radar*) em investigações de campo que englobam estudos hidrogeológicos, geotécnicos e ambientais. Para o alcance deste objetivo foram realizadas investigações de campo na região sudeste do Brasil procurando verificar a aplicabilidade deste método no conhecimento da sub-superfície. Os estudos englobaram a determinação da estratigrafia do solo identificando suas camadas e respectivas profundidades; a determinação da posição do lençol freático; a localização de estruturas enterradas e a detecção de possíveis anomalias decorrentes de contaminações. As seções obtidas com o GPR permitiram identificar com boa resolução os contrastes bruscos, como a posição do lençol freático e a localização das estruturas enterradas. A identificação dos contatos entre as camadas de solo foi possível quando as propriedades elétricas destes materiais se diferiam bastante. Já no que diz respeito ao mapeamento de regiões contaminadas, ainda se faz necessária a realização de uma maior quantidade de estudos para afirmar a eficiência do GPR para este objetivo. A utilização da técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) foi muito útil para correlacionar a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas com a profundidade. O seu emprego permitiu aumentar a exatidão da determinação das profundidades dos alvos de interesse.

Palavras-chave

GPR; Georadar; Radar de penetração; Investigação ambiental; Geofísica.

Abstract

Souza, Michelle Matos; Araruna, José Tavares (Advisor). **The use of Georadar (GPR) in environmental site investigation**. Rio de Janeiro, 2005. 120p. MSc Dissertation - Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work aims to assess the adequacy of the ground penetrating radar as a screening tool in site investigation practice in hydrogeological, geotechnical and environmental studies. An extensive site investigation program was carried out in Southeast Brazil looking for characterizing the subsurface. Tests were performed to determine the stratigraphy of soil profiles, the position of the water level, the detection of buried structures and contamination. The results have shown a great deal of success in identifying water levels and buried structures. Soil surfaces were only identified when abrupt changes in the dielectric constant of the porous media were observed. However, the results so far do not enable to delineate contamination plumes with the accuracy desired. The accuracy of the target depths were greatly improved by using the results of the dielectric constant measured by the time domain reflectometry (TDR).

Keywords

GPR; Ground Penetrating Radar; Environmental site investigation; Geophysics.

Sumário

1 Introdução	18
2 Método GPR (<i>Ground Penetrating Radar</i>)	21
2.1. Introdução	21
2.2. Histórico	22
2.3. Fundamentos teóricos	24
2.3.1. Propriedades elétricas e magnéticas	24
2.3.2. Uso do TDR (<i>Time Domain Reflectometry</i>) para determinação da constante dielétrica	29
2.3.3. Profundidade de penetração x resolução	30
2.3.4. Coeficiente de reflexão	32
2.4. Aquisição de dados	34
2.4.1. Sistema GPR	34
2.4.2. Planejamento de um levantamento GPR	35
2.4.3. Técnicas de aquisição de dados	35
2.5. Processamento dos dados	39
2.6. Interpretação dos dados	40
3 Equipamentos utilizados	42
3.1. GPR (<i>Ground Penetrating Radar</i>)	42
3.2. TDR (<i>Time Domain Reflectometry</i>)	43
3.3. Sistema GPS geodésico	44
3.4. Perfuratriz	45
4 Avaliação na caracterização da sub-superfície	47
4.1. Base de combustíveis em São Paulo	48
4.1.1. Aquisição de dados	50
4.1.2. Processamento dos dados	52
4.1.3. Análise dos resultados	52

4.2. Indústria mecânica em Nova Friburgo	57
4.2.1. Aquisição de dados	57
4.2.2. Processamento dos dados	59
4.2.3. Análise dos resultados	59
4.3. Considerações finais	63
5 Avaliação na detecção de contaminação por hidrocarbonetos	64
5.1. Descrição do meio físico	65
5.2. Aquisição de dados	67
5.2.1. Aquisições com o GPR	67
5.2.2. Sondagens	69
5.2.3. Direção do fluxo de água subterrânea/gradiente hidráulico	70
5.3. Processamento dos dados	70
5.3.1. Dados do GPR	70
5.3.2. Dados das sondagens e GPR	71
5.4. Análise dos resultados	72
5.5. Considerações finais	79
6 Avaliação na detecção de vazamentos no sistema de distribuição de água	80
6.1. Descrição da geologia	83
6.2. Aquisição de dados	84
6.2.1. Aquisições com o GPR	84
6.2.2. Sondagens e amostragens	86
6.2.3. TDR para obtenção da constante dielétrica do meio	88
6.3. Processamento dos dados	89
6.4. Análise dos resultados	89
6.5. Considerações finais	96
7 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	98
Referências Bibliográficas	102

Anexos	108
A Sondagens na base de combustíveis em SP/SP	109
B.1 Sondagens na base de combustíveis em SD/MG	110
B.2 Planilha de cálculo do gradiente hidráulico	117
C.1 Sondagens a percussão no Parque Gráfico do Globo	118
C.2 Sondagens a trado no Parque Gráfico do Globo	120

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Constante dielétrica (k) e condutividade elétrica (σ), observada nos materiais, comuns para as frequências utilizadas no GPR (Porsani, 1999)	27
Tabela 2.2 – Frequência central das antenas versus profundidade máxima de penetração (Porsani, 1999)	31
Tabela 2.3 – Frequência central das antenas versus resolução vertical (adaptado de Annan, 1992)	32
Tabela 2.4 – Coeficientes de reflexão para alguns contatos típicos (adaptado de Annan, 1992)	33
Tabela 3.1– Características técnicas da perfuratriz CT05	46
Tabela 6.1 – Teor de umidade dos solos amostrados	87
Tabela 6.2 – Resultados das análises de pH, condutividade e sais solúveis dos solos amostrados	87

Lista de figuras

Figura 2.1– Diagrama de arranjo das antenas	22
Figura 2.2 – Variação da constante dielétrica em função do conteúdo de água para os materiais geológicos (<i>Topp et al.</i> , 1980)	28
Figura 2.3 – Componentes básicos de um equipamento TDR (Chicota, 2003)	30
Figura 2.4 – Diagrama esquemático dos módulos básicos de um sistema GPR (Porsani, 1999)	34
Figura 2.5 – Esquema de aquisição de dados pela técnica CMP (Porsani, 1999)	36
Figura 2.6 – Esquema de aquisição de dados pela técnica WARR (Porsani, 1999)	36
Figura 2.7 - Esquema de aquisição de dados pelo perfil de reflexão (Porsani, 1999)	37
Figura 2.8 – Fluxograma das etapas de processamento dos dados de GPR	39
Figura 3.1– GPR e seus acessórios	42
Figura 3.2 – TDR e seus acessórios	44
Figura 3.3 – Sistema GPS geodésico e seus acessórios	45
Figura 3.4 – Perfuratriz de trado oco	46
Figura 4.1– Vista aérea da base de combustíveis	48
Figura 4.2 – Modelo Geológico da base de combustíveis (Araruna e outros, 2005)	49
Figura 4.3 – Seção geológica longitudinal na área de investigação geofísica (Araruna e outros, 2005)	50
Figura 4.4 – Aquisição com o GPR na base de combustíveis em São Paulo-SP	51
Figura 4.5 – Constante dielétrica sendo medida na base de combustíveis	51
Figura 4.6 – Primeiro perfil de GPR na área de circulação da base de combustíveis	53

Figura 4.7 – Segundo perfil de GPR na área de circulação da base de combustíveis	54
Figura 4.8 – Terceiro perfil de GPR na área de circulação da base de combustíveis	54
Figura 4.9 – Quarto perfil de GPR na base de combustíveis	55
Figura 4.10 – Quinto perfil de GPR na base de combustíveis	56
Figura 4.11 – <i>Lay out</i> da indústria mecânica com a localização e direção dos perfis GPR e das sondagens	58
Figura 4.12 – Furo de sondagem sendo perfurado com o auxílio da perfuratriz	58
Figura 4.13 – (a) Primeiro perfil de GPR adquirido na indústria mecânica (b) Sondagem correspondente	60
Figura 4.14 – Tambor metálico enterrado no subsolo	60
Figura 4.15 – Segundo perfil de GPR adquirido na indústria mecânica	61
Figura 4.16 – (a) Terceiro perfil de GPR adquirido na indústria de autopeças (b) Sondagem correspondente	62
Figura 4.17 – Localização da 3ª aquisição com detalhe da ferragem aparente no furo	63
Figura 5.1 – Foto da base de combustíveis em Santos Dumont–MG	66
Figura 5.2 – Planta de situação da base de combustíveis	66
Figura 5.3 - Planta de situação com a direção dos perfis GPR e localização dos furos de sondagem	68
Figura 5.4 – Aquisição com o GPR na base de combustíveis em Santos Dumont-MG	69
Figura 5.5 – Sondagem sendo realizada	70
Figura 5.6 – Modelo tri-dimensional da estrutura geológica e contaminação (Araruna e outros, 2004)	72
Figura 5.7 – Primeiro perfil de GPR na base de combustíveis	74
Figura 5.8 – Escória preenchida com óleo encontrada durante furo de sondagem	75
Figura 5.9 – <i>Scans</i> do perfil 1: (a) Região atenuada (b) Região não atenuada	75

Figura 5.10 – Segundo perfil de GPR na base de combustíveis	76
Figura 5.11 – Terceiro perfil de GPR na base de combustíveis	77
Figura 5.12 – Quarto perfil de GPR na base de combustíveis	78
Figura 5.13 – Quinto perfil de GPR na base de combustíveis	79
Figura 6.1 – Vista aérea do Parque Gráfico do Jornal O Globo (<i>EarthGoogle</i>)	80
Figura 6.2 – Vista superior da área de lazer do Parque Gráfico do Jornal O Globo	81
Figura 6.3 – Surgência de água na área de lazer	82
Figura 6.4 – Aquisição com o GPR no Parque Gráfico do Jornal O Globo	85
Figura 6.5 – <i>Lay out</i> com a localização e direção dos perfis GPR, das sondagens de interesse e dos pontos de medição de TDR	86
Figura 6.6 – Valor da constante dielétrica sendo medido com ao auxílio do TDR	88
Figura 6.7 – Seção geológica na área do Parque Gráfico obtida com resultados das sondagem a percussão	90
Figura 6.8 – Radargrama no topo do talude	91
Figura 6.9 – Segundo perfil de GPR, na base do talude, próximo a surgência de água	93
Figura 6.10 – Terceiro perfil de GPR adquirido na rua de acesso a área de lazer	95
Figura 6.11 – Quarto perfil de GPR adquirido entre o campo de futebol e a casa de lazer	95
Figura 7.1– Modelo desenvolvido para estudos com o GPR em escala de laboratório	101

Lista de símbolos e abreviaturas

\vec{B}	Campo indução magnético
c	Velocidade da luz
\vec{D}	Corrente de deslocamento ou polarização
e	Espaço percorrido pela onda eletromagnética
\vec{E}	Campo elétrico
ε	Permissividade dielétrica do material
ε_0	Permissividade dielétrica no vácuo
f	Frequência
\vec{H}	Campo magnético
\vec{J}	Corrente de condução
k	Constante dielétrica ou permissividade dielétrica relativa
L	Comprimento das hastes do TDR
λ	Comprimento de onda
μ	Permeabilidade magnética
ρ	Resistividade
σ	Condutividade elétrica
t	Tempo de deslocamento da onda eletromagnética
v	Velocidade
CMP	<i>Common mid-point</i>
C0	<i>Common offset</i>
EM	Eletromagnético
GPR	<i>Ground penetrating radar</i>

GSSI	<i>Geophysical Survey System, Inc.</i>
LNAPL	<i>Light non aqueous phase liquids</i>
PG	Parque Gráfico do Jornal O Globo
TDR	<i>Time Domain Reflectometry</i>
WARR	<i>Wide angle reflection and refraction</i>

1 Introdução

As investigações geo-ambientais fornecem subsídios para a implantação de obras de engenharia e controles ambientais. As ferramentas tradicionalmente utilizadas em tais investigações constituem em sondagens, amostragens e ensaios de campo. Essas técnicas possibilitam a identificação das diversas camadas componentes do substrato, além de permitir o conhecimento de algumas características e propriedades dos solos. Entretanto, estas ferramentas aliadas fornecem informações muito localizadas, mesmo que detalhadas, de pontos em uma superfície. A interpolação entre pontos de amostragem pode não representar a realidade, uma vez que as condições geológicas podem se modificar consideravelmente no espaço.

As técnicas geofísicas de superfície fornecem informações contínuas sobre as propriedades físicas e químicas da sub-superfície, tanto em profundidade como em extensão lateral, de forma não invasiva, contínua e rápida. Entre as técnicas geofísicas disponíveis, o GPR (*Ground Penetrating Radar*) produz as informações de mais alta resolução da sub-superfície.

Sendo assim, o GPR vem complementar as técnicas tradicionais comumente utilizadas para tal fim, fornecendo as informações necessárias entre os pontos investigados.

O método emprega o conceito de propagação de ondas eletromagnéticas no meio e é capaz de fornecer perfis contínuos e de alta resolução das características da sub-superfície, num alcance de poucos centímetros até dezenas ou centenas de metros. Por apresentar estas características, a técnica tem sido amplamente empregada em investigações ambientais, onde se faz necessário um mapeamento dos limites entre litologias, estratigrafias, propriedades físicas e áreas contaminadas.

Esta dissertação é parte integrante da linha de pesquisa em Geotecnia Ambiental do Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (DEC/PUC-Rio) e tem por objetivo avaliar a aplicabilidade do radar de penetração no solo, GPR, em investigações de campo. Em especial, destacam-se alguns propósitos:

- no conhecimento da estratigrafia;
- na determinação da profundidade do nível freático;
- na localização de estruturas enterradas (*e.g.*, tubulações de águas subterrâneas);
- na detecção de possíveis anomalias elétricas que podem estar relacionadas a contaminação/vazamentos.

O presente trabalho foi organizado em sete capítulos para uma melhor exposição dos temas abordados. A seqüência de apresentação adotada não corresponde a ordem cronológica dos eventos. Esta decisão foi tomada para facilitar o desenvolvimento e compreensão dos trabalhos.

O segundo capítulo contém uma revisão bibliográfica sobre a metodologia GPR. São abordados alguns fundamentos teóricos básicos sobre a propagação de ondas eletromagnéticas em altas frequências, as propriedades elétricas dos materiais, as principais equações físico-matemáticas do GPR e as técnicas de aquisição, processamento e interpretação dos dados.

No terceiro capítulo são apresentados os equipamentos utilizados durante a realização da pesquisa, sejam eles, GPR, TDR, GPS e Perfuratriz. É feita uma breve descrição dos seus acessórios, assim como de suas características, marcas e modelos.

O quarto capítulo traz os ensaios realizados em campo com o objetivo de avaliar a aplicabilidade do GPR na caracterização da sub-superfície (*i.e.*, no conhecimento da estratigrafia, na determinação da profundidade do lençol freático e na localização de estruturas enterradas).

No quinto e sexto capítulos são apresentados os ensaios realizados afim de avaliar a aplicabilidade do GPR em áreas que sofreram contaminação/vazamento. No primeiro, na detecção de contaminação por hidrocarbonetos oriundos de

vazamentos de tanques de armazenamento de combustíveis. No outro, na detecção de contaminação provocada por vazamentos no sistema de distribuição de água.

Além das abordagens já explicitadas, no quarto, quinto e sexto capítulo, são descritos os locais onde os ensaios foram realizados, os procedimentos de aquisição e processamento de dados, a análise dos resultados obtidos e as considerações finais feitas para cada trabalho.

Finalmente, no sétimo capítulo, são listadas as conclusões obtidas a respeito dos propósitos pré-estabelecidos, e as sugestões para trabalhos futuros.

2

Método GPR (*Ground Penetrating Radar*)

2.1.

Introdução

Métodos geofísicos fornecem informações sobre algumas das propriedades físicas do subsolo, suas condições e processos, sem a necessidade de escavação ou sondagem. Eles se subdividem em métodos ativos e passivos. Os primeiros medem a resposta do subsolo à energia eletromagnética, elétrica e sísmica, enquanto os métodos passivos medem o campo magnético, elétrico e gravitacional naturais da Terra. Os métodos geofísicos também podem ser subdivididos em métodos de superfície e de poços. Nos métodos de superfície, os instrumentos de medida são posicionados na superfície do terreno. Já os métodos geofísicos de poços requerem que poços ou furos de sondagens estejam instalados para que os instrumentos de medida sejam colocados no interior do poço.

O Radar de Penetração em solo, GPR (*Ground Penetrating Radar*) ou ainda Georadar, é um método geofísico de superfície que utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência, entre 10 e 2500 MHz, para mapear estruturas e feições geológicas rasas da sub-superfície ou ainda localizar objetos enterrados. Segundo Porsani (1999), este método se assemelha ao método de reflexão sísmica e ao sonar, no princípio físico e na metodologia do levantamento de campo, com a exceção de que é baseado na reflexão de ondas eletromagnéticas.

O princípio físico do método consiste na emissão de ondas eletromagnéticas (EM) que são geradas através de um curto pulso de alta frequência e que, por sua vez, são repetidamente radiadas para dentro do terreno por uma antena transmissora. A propagação do sinal e a profundidade de alcance das ondas EM dependem da frequência do sinal emitido e das propriedades elétricas dos materiais (condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética). As variações nessas propriedades elétricas fazem com que parte do sinal emitido seja refletida; essas ondas, então refletidas e difratadas em sub-superfície, são recebidas por outra antena também colocada na superfície e

denominada de antena receptora. A Figura 2.1 apresenta o princípio de funcionamento. A energia refletida é registrada em função do tempo de percurso (tempo duplo), que é amplificada, digitalizada e gravada no disco rígido do computador, deixando os dados prontos para um posterior processamento quando se fizer necessário (Nunes, 2002).

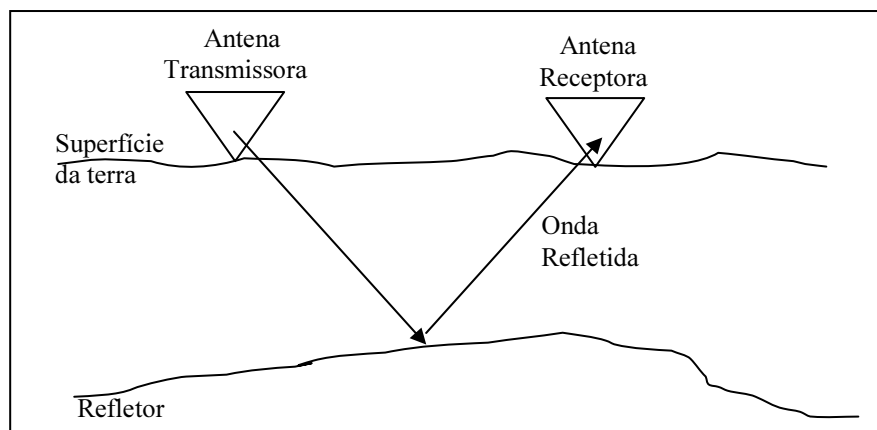


Figura 2.1– Diagrama de arranjo das antenas

Os perfis de reflexão GPR, comumente denominados radargramas, são então obtidos movendo-se as antenas transmissora e receptora com um intervalo de espaçamento constante; maiores detalhes acerca dos métodos de aquisição de sinais podem ser obtidos no item 2.4. O resultado de um perfil GPR é uma imagem das variações em sub-superfície das propriedades elétricas em função do tempo duplo de percurso do pulso eletromagnético.

2.2. Histórico

A utilização de ondas de rádio de altas frequências para o conhecimento de feições de sub-superfície data do final da década de 20. Segundo Olhoeft (1996), o primeiro trabalho foi realizado na Alemanha em 1929, com o objetivo de determinar a espessura de uma geleira. Entretanto, esta tecnologia foi pouco utilizada até a década de 50. Isto se deveu muito provavelmente às limitações instrumentais. No entanto, os interesses científicos voltados ao tema foram reativados devido à queda de placas de gelo na Groelândia (Olhoeft, 1996). Já na década de 60, um dos maiores sucessos deste método consistiu na sua utilização para a determinação da espessura de placas de gelo no Ártico e na Antártida (Scaife & Annan, 1991).

O trabalho em ambiente sem gelo iniciou-se em meados da década de 70. Segundo Ulriksen (1982), uma intensificação nas atividades de pesquisa ocorreu associada com a missão à Lua com a nave Apollo 17. A partir desse evento, a utilização do sistema GPR foi intensificada e, deste modo, surgiram diversas aplicações, pesquisas e publicações.

Na década de 80, foi reconhecido como método de exploração geofísica por parte da comunidade geocientífica mundial. Segundo Porsani (1999), isso se deveu ao desenvolvimento tecnológico, que possibilitou a construção de equipamentos com os modos de aquisição de registros digitais, otimizando sua portabilidade, baixando seu custo, tornando-se mais fácil a sua aquisição e, portanto, a sua utilização. Como consequência, um grande número de trabalhos científicos utilizando o método GPR, foi publicado nessa década, dentre eles, considera-se de maior significância os trabalhos escritos em Ulriksen, 1982; Annan *et al.*, 1984, 1988; Olhoeft, 1984; Davis *et al.*, 1984, 1985; Fenner&Smith, 1985.

No aspecto prático, o GPR é uma técnica muito versátil e, desde a década de 90 até os dias atuais, ele tem sido utilizado na geologia, na geotecnia, na hidrogeologia, no meio ambiente, nas ciências do solo, na arqueologia e em vários outros campos. Dentre suas aplicações, podem ser destacadas: localização de objetos enterrados em ambiente urbano, por exemplo, galerias de canalização de águas pluviais, canos e dutos (metálicos ou não metálicos); localização de sítios arqueológicos; localização de “plumas” de contaminação (orgânica e inorgânica); localização de fraturas em rocha e determinação da profundidade do topo rochoso; determinação da profundidade do nível freático; entre outras. Sendo que muitos desses trabalhos foram realizados em países da América do Norte, Europa e Ásia, nos quais o tipo de solo e as condições climáticas diferem dos solos tropicais. Destacam-se os trabalhos publicados em Annan *et al.*, 1991; Beres & Haeni, 1991; Scaife & Annan, 1991; Benson, 1995; Greenhouse *et al.*, 1995; Mellett, 1995; Grasmueck, 1996; Olhoeft, 1996; Sauck *et al.*, 1998; Atekwana *et al.*, 2000.

No Brasil, os primeiros trabalhos de aplicação do método GPR foram realizados pelo Centro de Pesquisa da PETROBRAS (Cenpes/PETROBRAS), em 1994. No entanto, apesar do sucesso das aplicações do método GPR em vários países, é necessário estudar as potencialidades do método em condições geológicas e geotécnicas brasileiras.

2.3. Fundamentos teóricos

O conhecimento da fundamentação teórica e das limitações do método GPR são necessários para se fazer um bom uso do método durante a aquisição dos dados (Porsani, 1999). Os fundamentos do método GPR estão embasados na teoria de propagação das ondas eletromagnéticas, ou seja, nas equações de Maxwell. Estas equações são utilizadas para estudar a estrutura interna da Terra, a partir de suas propriedades elétricas e magnéticas, descrevendo o comportamento do campo eletromagnético em qualquer meio. Entretanto, elas não possuem nenhuma informação sobre as propriedades elétricas dos materiais por onde os campos elétricos e magnéticos atuam. Dessa forma, é necessário introduzir as relações constitutivas do meio, que relacionam o campo elétrico externo aplicado ao campo interno pelas propriedades elétrica e magnética dos materiais.

2.3.1. Propriedades elétricas e magnéticas

As propriedades EM dos materiais dependem de sua composição e umidade, ambos controlando a velocidade de propagação das ondas EM e sua atenuação (Annan, 1992). Os materiais geológicos (rochas sedimentares, ígneas e metamórficas) podem ser considerados semi-condutores ou dielétricos, podendo ser caracterizados por três propriedades: condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética.

2.3.1.1. Condutividade elétrica

A primeira relação constitutiva do meio, conhecida como Lei de Ohm, relaciona a densidade de corrente de condução (\vec{J}) ao campo elétrico (\vec{E}), e é escrita como:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.1)$$

Nos materiais geológicos simples, essa relação é aproximadamente linear e a constante de proporcionalidade é a condutividade elétrica (σ). A condutividade elétrica de um material é uma medida de sua habilidade em conduzir corrente elétrica (Keller, 1987). A condutividade, em geral, é expressa em Siemens por

metro (S/m). Para as investigações rasas, como é o caso das aplicações do GPR, é mais comum trabalhar com a unidade em mS/m.

Segundo Keller (1987), a condutividade (σ), ou o seu inverso, a resistividade (ρ), pode variar até 20 ordens de magnitude para os materiais geológicos. Os principais fatores que afetam a condutividade elétrica nos materiais geológicos próximos a superfície são: o teor de umidade, a porosidade, a salinidade, a proporção da fração argila e a presença de minerais condutivos.

2.3.1.2. Permissividade dielétrica

A segunda relação constitutiva do meio relaciona diretamente o campo elétrico (\vec{E}) à corrente de deslocamento, ou à polarização (\vec{D}), e a constante de proporcionalidade é a permissividade dielétrica do material (ϵ). Segundo:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.2)$$

De acordo com Annan (1996), tanto a condutividade elétrica quanto a permissividade dielétrica são importantes, posto que afetam diretamente a atenuação e a propagação das ondas de radar, respectivamente. Ward & Hohmann (1987) sugerem que a condutividade é dominante para ondas EM de baixas frequências (<1MHz), enquanto que em altas frequências (>1MHz) a permissividade dielétrica é dominante. Usualmente, utiliza-se a permissividade dielétrica relativa (ϵ_r) ou constante dielétrica dos materiais (k), definida como:

$$k = \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.3)$$

onde:

ϵ = permissividade dielétrica do material (F/m);

$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m, é a permissividade dielétrica no vácuo.

2.3.1.3. Permeabilidade magnética

A terceira relação constitutiva do meio relaciona diretamente o campo magnético (\vec{H}) com o campo indução magnética (\vec{B}), e a constante de

proporcionalidade é a permeabilidade magnética do material (μ). A permeabilidade magnética é obtida de acordo com a seguinte relação:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.4)$$

Em muitas situações geológicas, os fatores mais importantes que controlam as respostas GPR são as propriedades elétricas. Para a propagação de ondas EM nas frequências do radar, supõe-se que a permeabilidade magnética da maioria dos materiais geológicos é essencialmente independente da frequência, e não varia significativamente em relação à permeabilidade magnética do vácuo (Olhoeft, 1981; Keller, 1987). Portanto, o efeito da variação na permeabilidade magnética não tem sido considerado quando são feitas medidas eletromagnéticas na Terra (Topp *et al.*, 1980; Ward & Hohman, 1987). Segundo Annan (1992), deve-se atentar para o fato de que os efeitos de uma forte permeabilidade magnética podem não ser totalmente ignorados nas seções de GPR.

Substituindo-se as relações constitutivas do meio nas equações de Maxwell, obtém-se as equações de propagação da onda EM num determinado meio, onde os fatores mais importantes que as governam são a velocidade e a atenuação. Maiores detalhes sobre as deduções matemáticas podem ser encontradas em Annan (1992) e Porsani (1999).

Para materiais geológicos com baixa perda, o campo EM propaga-se com uma velocidade de fase dada por:

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (2.5)$$

onde:

c = velocidade da luz = $2,997 \times 10^8$ m/s \cong 0,3 m/ns;

k = permissividade dielétrica ou constante dielétrica dos materiais.

Os valores da constante dielétrica e condutividade elétrica para vários materiais estão listados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Constante dielétrica (k) e condutividade elétrica (σ), observada nos materiais, comuns para as frequências utilizadas no GPR (Porsani, 1999)

Materiais	Constante Dielétrica (k)	Condutividade Elétrica (σ) mS/m
Ar	1	0
Água destilada	81	0,01
Água fresca	81	0,5
Água do mar	81	3000
Areia seca e cascalho	2-6	0,01
Areia saturada	20-30	0,1-1
Argila seca	5	2
Argila saturada	40	1000
Calcáreo seco	4	0,5
Calcáreo saturado	8	2
Folhelho e siltito seco	5	1
Folhelho saturado	7	100
Siltito saturado	30	100
Silte saturado	10	1-10
Arenito saturado	20-30	40
Solo arenoso seco	2,6	0,14
Solo arenoso saturado	25	6,9
Solo argiloso seco	2,4	0,27
Solo argiloso saturado	15	50
Basalto seco	6	1
Basalto saturado	8	10
Diabásio seco	7	10
Diabásio saturado	8	100
Granito seco	5	0,01
Granito saturado	7	1
Sal seco	5-6	0,01-1
Ferro	1	10^9
Aço	1	∞
PVC	8	0
Asfalto	3-5	0
Concreto seco	5,5	0
Concreto saturado	12,5	0
LNAPL	2	0
DNAPL	2-3	0
Hexano	1,88	0,5
Diclorometano	8,3	1,1
Benzeno	2,24	0,11
Metanol	33,7	0,38
Mistura de óleo e outras substâncias orgânicas	2	0,5

A Tabela 2.1 mostra a constante dielétrica e a condutividade elétrica observada em alguns materiais para as frequências utilizadas no GPR. Pode-se perceber através destes valores, que o teor de umidade volumétrico de água pode alterar substancialmente as características elétricas das rochas e dos solos. Isto ocorre porque os íons dissolvidos na água proporcionam um mecanismo de condução elétrica, que dissipa o campo eletromagnético aplicado, pois a energia do campo EM é extraída e transferida irreversivelmente para o meio, provocando assim, a atenuação e baixa penetração da onda EM no meio.

Na Figura 2.2 é apresentada uma variação típica da constante dielétrica (k) com o conteúdo volumétrico de água nos solos. Essa curva foi obtida empiricamente por Topp *et al.* (1980), usando medidas do tempo de propagação de ondas eletromagnéticas nas frequências de rádio para diversos tipos de materiais geológicos.

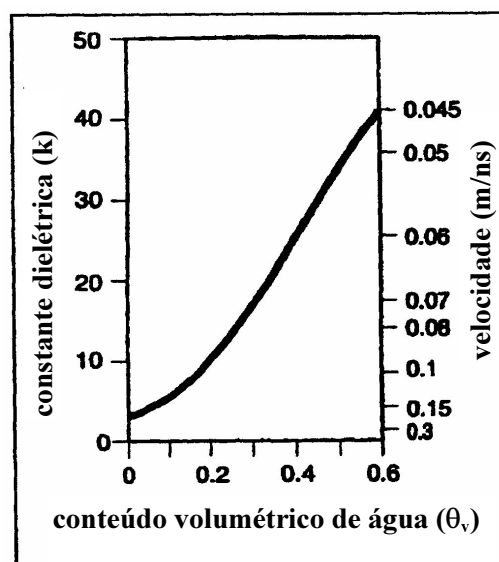


Figura 2.2 – Variação da constante dielétrica em função do conteúdo de água para os materiais geológicos (Topp *et al.*, 1980)

Além da constante dielétrica ser influenciada pelo conteúdo de água no meio, ela também reflete algumas interações, tais como: entre a porosidade, as características do fluido intersticial, a superfície específica, a mineralogia, a estrutura e a temperatura (Nunes, 2002). A relevância de cada parâmetro varia com a frequência utilizada. Santamarina (2001) apresenta um estudo mais detalhado destas interações, expondo relações empíricas correlacionando alguns parâmetros do solo com a constante dielétrica, em função da frequência aplicada.

O autor também relata a dificuldade em avaliar e medir o efeito de cada um destes parâmetros na propagação de ondas eletromagnéticas.

2.3.2.

Uso do TDR (*Time Domain Reflectometry*) para determinação da constante dielétrica

A técnica TDR constitui um método para a determinação da constante dielétrica do meio (k). Ultimamente, vem despertando muito interesse principalmente devido a possibilidade de leituras em tempo real e automatizadas (Oliveira, 2003).

A técnica consiste basicamente na determinação da constante dielétrica (k) medindo-se o tempo de propagação de uma onda eletromagnética através de um cabo coaxial até as guias de onda (geralmente hastes metálicas de comprimento definido L), imerso em um meio. A fonte geradora do TDR aplica uma rápida e crescente voltagem ao cabo coaxial. O sinal caminha ao longo do cabo até alcançar as guias de onda inseridas no solo. Parte da onda incidente é refletida de volta ao atingir a guia devido à diferença de impedância entre esta e o cabo coaxial. Essa reflexão também é devida a diferenças de impedância entre os meios em que as hastes (solo) e o cabo se encontram (ar). O remanescente da onda propaga-se pelas hastes paralelas (guias de onda) até alcançar a sua extremidade, sendo também refletida, devido a uma nova diferença de impedância. Vários pulsos são gerados pelo TDR na quantidade necessária para produzir um gráfico da relação entre variações da impedância (coeficiente de reflexão) e tempo. Esse gráfico fornece o tempo entre a chegada dos sinais refletidos do início das hastes dentro do solo e os refletidos no final das guias de onda. Com o tempo de passagem da onda eletromagnética (t) pela guia de onda inserida dentro do solo, calcula-se a velocidade de propagação do pulso no solo, dada por:

$$v = \frac{2L}{t} \quad (2.6)$$

Sendo assim, a constante dielétrica do meio que contém o sensor fica definida:

$$k = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (2.7)$$

Diversos estudos, entre eles Marinho e outros (2005) e Tommaselli (2001), tem sido conduzidos para a aplicação do TDR na obtenção do teor de umidade volumétrico dos solos, indiretamente obtido por meio de sua correlação com a constante dielétrica. Diversas variantes tem sido testadas, entre elas a densidade do solo e o modo de instalação da guia de onda, para verificar seus efeitos sobre a curva de calibração do TDR para o solo estudado.

A Figura 2.3 mostra um diagrama dos componentes básicos de um equipamento de TDR.

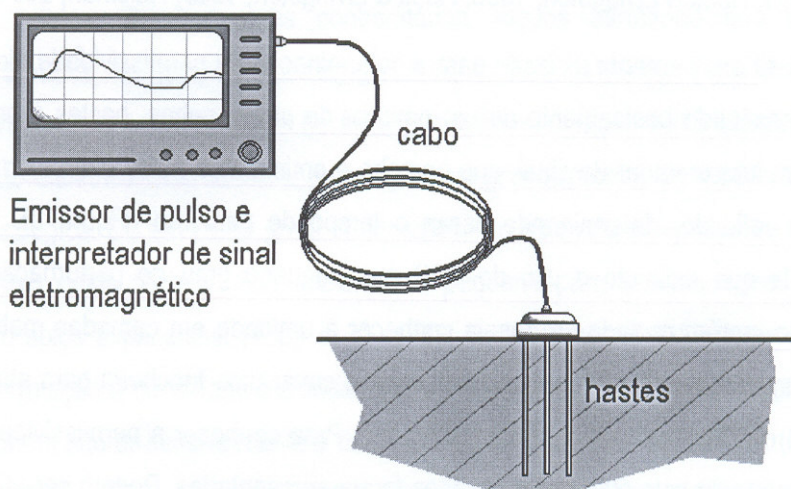


Figura 2.3 – Componentes básicos de um equipamento TDR (Chicota, 2003)

2.3.3. Profundidade de penetração x resolução

O sistema GPR é especificado pela sua frequência central (f_c) e, normalmente, suas antenas, transmissora e receptora, são projetadas para atuar numa faixa situada entre 0,5 vezes a frequência central (frequência mínima) até 1,5 vezes a frequência central (frequência máxima).

A frequência central tem um importante papel para a profundidade de penetração da onda EM em sub-superfície, sendo esta a principal limitação do GPR. Aumentando-se a frequência da onda transmitida resulta em maior resolução da sub-superfície e menor profundidade de penetração. Por outro lado, diminuindo-se a frequência, aumenta-se a profundidade de penetração, e, por conseguinte, uma menor resolução. Além da frequência central, a profundidade de

penetração da onda também é altamente dependente das propriedades elétricas dos materiais geológicos, *i.e.*, condutividade elétrica e constante dielétrica.

A Tabela 2.2 mostra os valores das frequências centrais das antenas com suas respectivas profundidades máximas de penetração. Segundo Porsani (1999), estes valores foram estimados com base nos experimentos práticos realizados por várias empresas fabricantes de equipamentos GPR (“*Mala Geoscience*” - empresa sueca; “*Sensors & Software*” – empresa canadense e “*Geological Survey Service Inc.*” – empresa americana). Quando *a priori* as informações geológicas são poucas ou até mesmo inexistentes, esta tabela serve como guia prático para os trabalhos de campo.

Tabela 2.2 – Frequência central das antenas versus profundidade máxima de penetração (Porsani, 1999)

Frequência central (MHz)	Profundidade Máxima de Penetração (m)
1000	1
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

Segundo Daniels *et al.*(1998), a profundidade de penetração pode variar de 4 km no gelo, 1 a 1,5 km na Lua, centenas de metros em rochas de sal, dezenas de metros no granito, areias e cascalhos, até poucos metros em solos com alto conteúdo de argila.

De acordo com Duke (1990), a profundidade de penetração nos materiais é controlada principalmente por quatro tipos diferentes de perdas por atenuação: condução elétrica, polarização, espalhamento geométrico e perdas por dispersão. As perdas por condução elétrica são dominantes nos materiais condutivos para baixas frequências e são proporcionais à condutividade elétrica do meio (Olhoeft, 1981). As perdas por polarização, dominantes para as altas frequências, ocorrem quando a molécula de água não consegue mais se polarizar na presença de um campo aplicado a partir de uma determinada frequência de polarização. Estas também são conhecidas como frequência de relaxação e ocorrem em torno de 20 GHz. Esse fenômeno é conhecido como relaxação dielétrica da água. As perdas

por espalhamento geométrico (“*geometric spreading*”) são independentes do meio, e correspondem à atenuação da amplitude do sinal decorrente da frente de onda que se espalha esféricamente. Finalmente, as perdas por difusão (“*scattering losses*”) são causadas pelas heterogeneidades dos materiais quando estas têm tamanhos comparáveis ao comprimento de onda. As heterogeneidades mais comuns são: porosidade, contatos litológicos, buracos de tatus e insetos.

A resolução vertical corresponde a habilidade de distinguir as reflexões provenientes do topo e da base de camadas de pequena espessura. A Tabela 2.3 apresenta alguns valores estimados de resolução vertical, obtidos em Annan (1992), para as frequências centrais do GPR

Tabela 2.3 – Frequência central das antenas versus resolução vertical (adaptado de Annan, 1992)

Frequência central (MHz)	Resolução vertical (m)
200	0,25
100	0,50
50	1,00
25	2,00

A resolução horizontal é determinada pelo padrão de radiação da antena, o que pode ser comparado a um feixe de luz de uma lanterna cuja área de iluminação se expande com a distância do alvo. O padrão de radiação da antena é complexo; mas pode ser aproximado por um cone vertical, com um ângulo de abertura de 30° e com o vértice localizado na antena transmissora. Dessa forma, a informação refletida é uma média sobre a superfície refletora “iluminada” por esse feixe de ondas eletromagnéticas (Greenhouse *et al.*, 1995). Maiores detalhes sobre o padrão de radiação da antena podem ser encontrados em Annan, 1992.

2.3.4. Coeficiente de reflexão

Quando a onda do radar se propaga em um meio, ela se depara com variações nas propriedades elétricas oriundas da existência de diversas camadas. Entretanto, essas variações nas propriedades podem causar uma forte impedância elétrica na interface que separa estas camadas, determinando a quantidade do sinal que deverá ser refletido. Isto é normalmente expresso pelo coeficiente de reflexão.

As ondas de radar são refletidas e refratadas nas interfaces que separam meios com características elétricas diferentes. A reflexão e a refração de ondas planas são governadas pela lei de Snell e pelas equações de Fresnel. A lei de Snell especifica uma relação angular entre a onda EM incidente, a onda refletida e a onda refratada. As equações de Fresnel relacionam as amplitudes dos campos elétricos e magnéticos.

Em estudos de GPR, normalmente supõe-se que as ondas EM se propagam com uma incidência normal às interfaces das camadas (Annan, 1992). Nessa situação, a amplitude do coeficiente de transmissão (r_{GPR}) definida como a razão do campo elétrico transmitido pelo incidente, pode ser reduzida para:

$$r_{\text{GPR}} = \frac{\sqrt{k_1} - \sqrt{k_2}}{\sqrt{k_1} + \sqrt{k_2}} \quad (2.8)$$

onde k_1 e k_2 correspondem às constantes dielétricas acima e abaixo da superfície refletora, respectivamente. Maiores detalhes sobre as deduções matemáticas desta equação podem ser encontrados em Porsani (1999) e Annan (1992).

A Tabela 2.4 mostra os valores do coeficiente de reflexão típicos de algumas interfaces para as frequências do radar.

Tabela 2.4 – Coeficientes de reflexão para alguns contatos típicos (adaptado de Annan, 1992)

De:		Para:		Coeficiente de Reflexão (%)
Ar	$k = 1$	Solo seco	$k = 5$	38
Solo seco	$k = 5$	Água	$k = 81$	80
Solo seco	$k = 5$	Solo saturado	$k = 25$	38
Solo seco	$k = 5$	Rocha	$k = 8$	12
Solo saturado	$k = 25$	Rocha	$k = 8$	28
Solo	$k = 3,5$	Metal	$k = \infty$	100

A interface ar/solo seco produz uma forte reflexão com 38% da energia incidente. Para evitar essa reflexão indesejada nos levantamentos GPR, ou pelo menos para minimizar tal reflexão, as antenas devem ser colocadas o mais próximo possível do solo. Observa-se que a interface solo seco/água também constitui um excelente refletor apresentando 80% da energia incidente. Portanto, o GPR pode ser perfeitamente utilizado para localização do nível do lençol freático.

Finalmente, a interface solo/metal produz uma reflexão total, sendo a situação ideal para as aplicações do GPR na localização de tubos e dutos metálicos enterrados.

2.4. Aquisição de dados

2.4.1. Sistema GPR

O sistema GPR é normalmente projetado em módulos para dar maior flexibilidade nas operações de campo, sendo todos eles acessados via computador. A Figura 2.4 apresenta um diagrama esquemático dos módulos básicos de um sistema GPR.

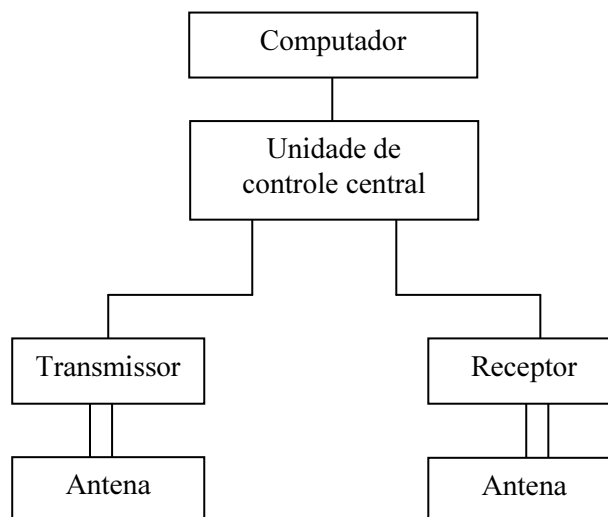


Figura 2.4 – Diagrama esquemático dos módulos básicos de um sistema GPR (Porsani, 1999)

2.4.1.1. Antenas

As antenas utilizadas podem ser blindadas ou não. As do tipo não blindadas possuem a vantagem de se poder trabalhar com diversas orientações entre as antenas transmissora e receptora, além de se poder variar a distância entre elas, permitindo assim o emprego de diversas técnicas de aquisição descritas na seção 2.4.3. Entretanto, possuem a desvantagem de sofrerem interferências provocadas por ruídos eletromagnéticos externos (*e.g.*, torres de alta tensão, celulares, rádios,

entre outros). Já as antenas blindadas, fornecem maior facilidade e velocidade nos trabalhos de aquisição. As antenas ficam alocadas a uma distância e orientação fixas em uma caixa blindada, que as protege de interferências externas.

2.4.2. Planejamento de um levantamento GPR

Um levantamento GPR deve ser planejado procurando avaliar previamente a viabilidade da utilização do método, uma vez que o problema foi definido. A definição do problema consiste em responder algumas questões, tais como: qual é a profundidade e a geometria do alvo, se existe contraste suficiente entre as propriedades elétricas, quais são as dificuldades da região (relevo acidentado, mata fechada, etc.), se há fontes de ruído eletromagnético (postes de iluminação, torres de alta tensão, cercas metálicas, antenas de rádio, etc.) e se existem dados disponíveis de levantamentos geológicos, geofísicos e geotécnicos na área do levantamento GPR a ser realizado.

2.4.3. Técnicas de aquisição de dados

O sistema GPR pode ser operado através de três modos básicos: perfis de reflexão com afastamento constante ou “*common offset*”, sondagens de velocidade e a técnica de trans-iluminação ou tomografia.

As sondagens de velocidade são normalmente usadas na sísmica de reflexão e podem perfeitamente ser aplicadas no GPR. São medidas indiretas que podem ser feitas por duas formas: CMP – “*Common Mid Point*” e WARR – “*Wide Angle Reflection and Refraction*”. Ambas as técnicas são usadas para obter uma estimativa da velocidade do sinal do GPR versus a profundidade na terra, através da variação do espaçamento das antenas para uma localização fixa e medindo-se a mudança do tempo duplo das reflexões de sub-superfície. Na técnica CMP, a abertura entre as antenas (transmissora e receptora) é crescente em sentidos opostos partindo de um ponto central fixo, conforme mostra a Figura 2.5. Já na técnica WARR, uma das antenas é mantida fixa, enquanto a outra é sucessivamente afastada da primeira, conforme mostra a Figura 2.6. Entretanto, a

velocidade verdadeira pode ser determinada medindo-se a constante dielétrica do solo e substituindo-a na equação 2.5.

O perfil de reflexão é o modo mais comum de operação e foi utilizado nesta pesquisa. Nesta técnica, a geometria das antenas transmissora e receptora é mantida com uma distância fixa constante, sendo transportada ao longo do perfil para imagear as reflexões versus a posição das antenas. O resultado obtido é um perfil GPR, onde no eixo horizontal estão as distâncias percorridas pelo deslocamento das antenas, mostrando as variações das propriedades elétricas de sub-superfície (reflexões) em função do tempo duplo (tempo de ida e volta do sinal) de percurso do sinal refletido no eixo vertical. A Figura 2.7 mostra o esquema de aquisição de dados pelo perfil de reflexão.

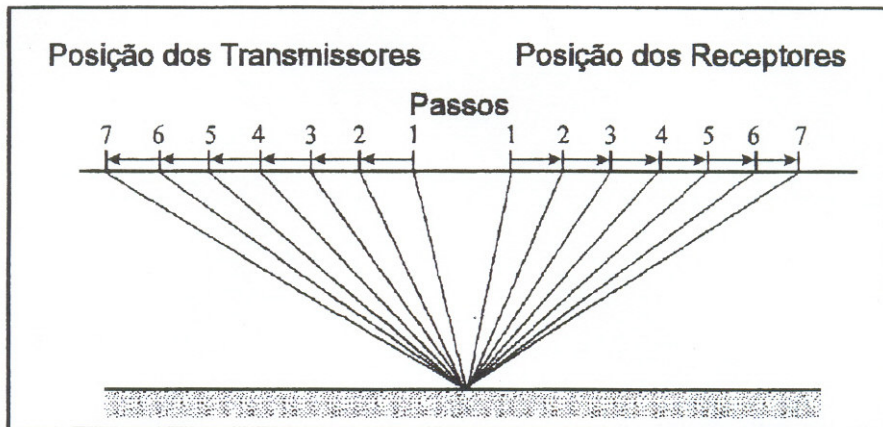


Figura 2.5 – Esquema de aquisição de dados pela técnica CMP (Porsani, 1999)

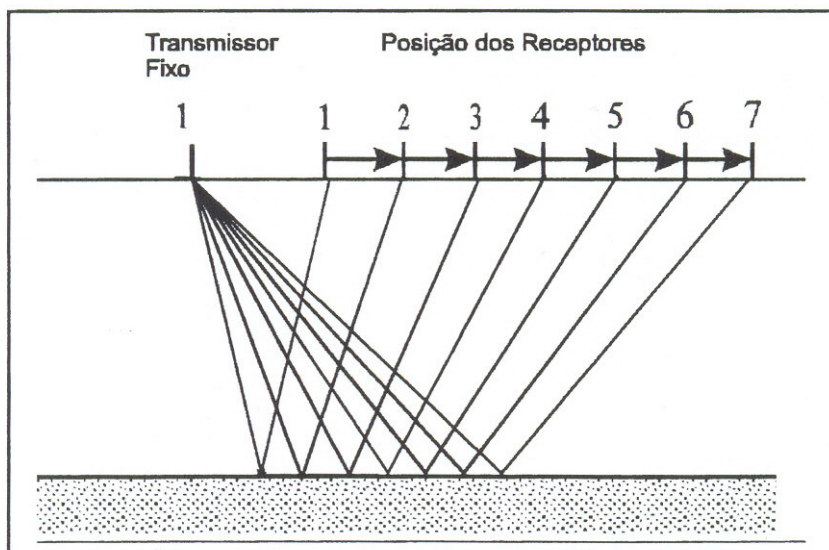


Figura 2.6 – Esquema de aquisição de dados pela técnica WARR (Porsani, 1999)

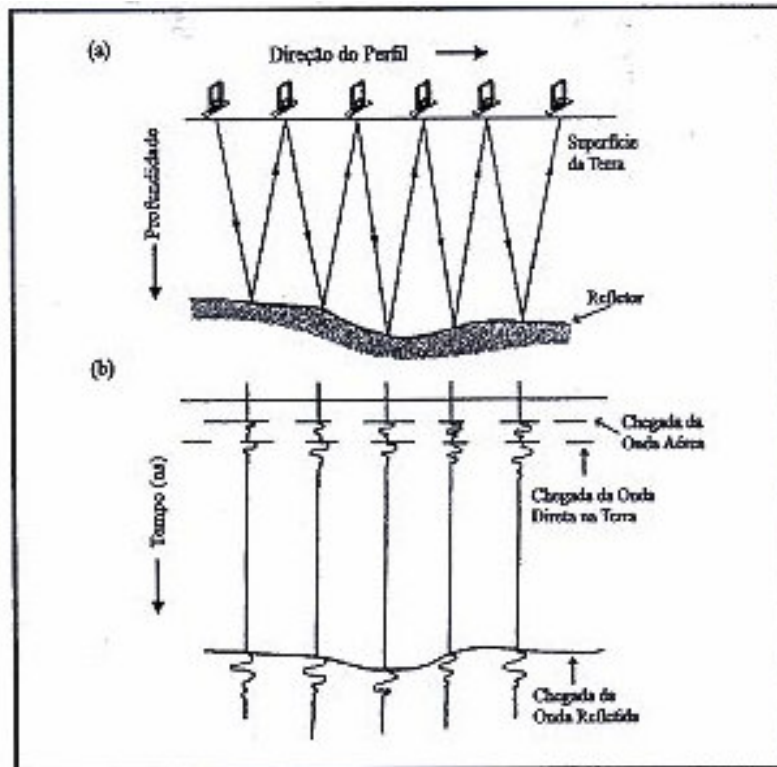


Figura 2.7 - Esquema de aquisição de dados pelo perfil de reflexão (Porsani, 1999)

Para a aquisição dos perfis de reflexão, os parâmetros que devem ser analisados são: a frequência da antena, a abertura da janela temporal, a amostragem espacial, a orientação e o espaçamento entre as antenas (no caso de antenas não blindadas), a localização e orientação do perfil e, finalmente, o número de amostras por traço.

A escolha da frequência da antena dependerá do objetivo de cada levantamento. Existe uma relação entre a profundidade de penetração e a resolução quando selecionada uma frequência de operação. As Tabela 2.2 e 2.3 servem como guia de referência para a escolha da frequência de operação da antena. Vale ressaltar que, se mais de uma antena estiver disponível, e o tempo e os recursos permitirem, todas as antenas devem ser utilizadas a fim de que as informações se complementem.

A abertura da janela temporal, ou “*range*”, significa quanto tempo que se deve deixar a janela de tempo aberta, para que o sinal seja transmitido e refletido, retornando ao receptor. Isto depende da profundidade que se deseja atingir, da velocidade da onda EM no meio e da frequência da antena utilizada. Para penetrações mais profundas, deve-se ter uma maior abertura da janela temporal,

significando que uma maior quantidade de dados estão sendo registrados (Annan, 1992).

O intervalo de amostragem espacial ou o intervalo entre as emissões do sinal eletromagnético é de extrema importância durante os procedimentos de aquisição de dados. Para se obter uma resposta sem “*aliasing*”, isto é, sem falsa amostragem, não se deve exceder o intervalo de amostragem de Nyquist. Segundo Annan (1992), o intervalo de amostragem de Nyquist varia de $\frac{1}{4}$ até $\frac{1}{2}$ do comprimento de onda (λ). Quando o intervalo é muito grande, os dados não definem adequadamente refletores com mergulhos acentuados. Do ponto de vista prático, o volume de dados adquiridos e o tempo do levantamento são reduzidos pelo aumento no espaçamento entre as emissões; entretanto, do ponto de vista da interpretação dos dados, é importante aderir-se à amostragem de Nyquist para que não ocorra uma falsa amostragem espacial. Além disso, o aspecto visual dos dados também é um importante fator para o olho humano.

No caso das antenas não blindadas, considera-se a separação das antenas igual a 20% da profundidade do alvo quando não se tem maior conhecimento da área a ser investigada (Annan, 1992). Na prática, a distância entre as antenas transmissora e receptora é adotada como sendo igual ao comprimento das antenas. As antenas blindadas, utilizadas neste trabalho, possuem um espaçamento fixo fornecido pelo fabricante.

A localização dos perfis GPR é importante para se saber a origem dos dados. Os perfis são orientados perpendicularmente à direção da estrutura da sub-superfície, pois as reflexões serão inclinadas, distintas de ruídos (horizontais) tornando sua identificação mais fácil.

A escolha da orientação das antenas afeta a qualidade dos dados devido aos diferentes padrões de radiação. Os levantamentos GPR são normalmente realizados com ambas as antenas, transmissora e receptora, perpendiculares a direção do perfil, onde o pulso é radiado com o campo elétrico transversal à direção do perfil, definido como padrão TE – transversal elétrico, o qual apresenta a mais larga cobertura angular de um refletor em sub-superfície. Esta orientação também é a utilizada nas antenas blindadas. Maiores detalhes sobre os padrões de radiação das antenas podem ser obtidos em Annan (*op. cit.*).

O número de amostras por traço significa quantos pontos devem ser amostrados em um traço. Este parâmetro deve ser cuidadosamente adotado para

evitar o efeito de “aliasing” (falsa amostragem), e é utilizado para transformar o dado analógico em digital. A discretização do traço pode variar de 128 a 1024. Um valor adequado e comumente utilizado é 512.

2.5. Processamento dos dados

O processamento dos dados GPR, posterior ao levantamento de campo, normalmente é realizado de maneira sistemática, podendo remover ou realçar certas feições de interesse. Ele envolve basicamente as seguintes etapas: edição dos dados, processamento do sinal e apresentação da imagem processada. A Figura 2.8 mostra o fluxograma básico das etapas do processamento. Vale ressaltar que esses procedimentos são normalmente atividades muito dependentes do intérprete, sendo, portanto, muito interativos e infinitamente subjetivos.

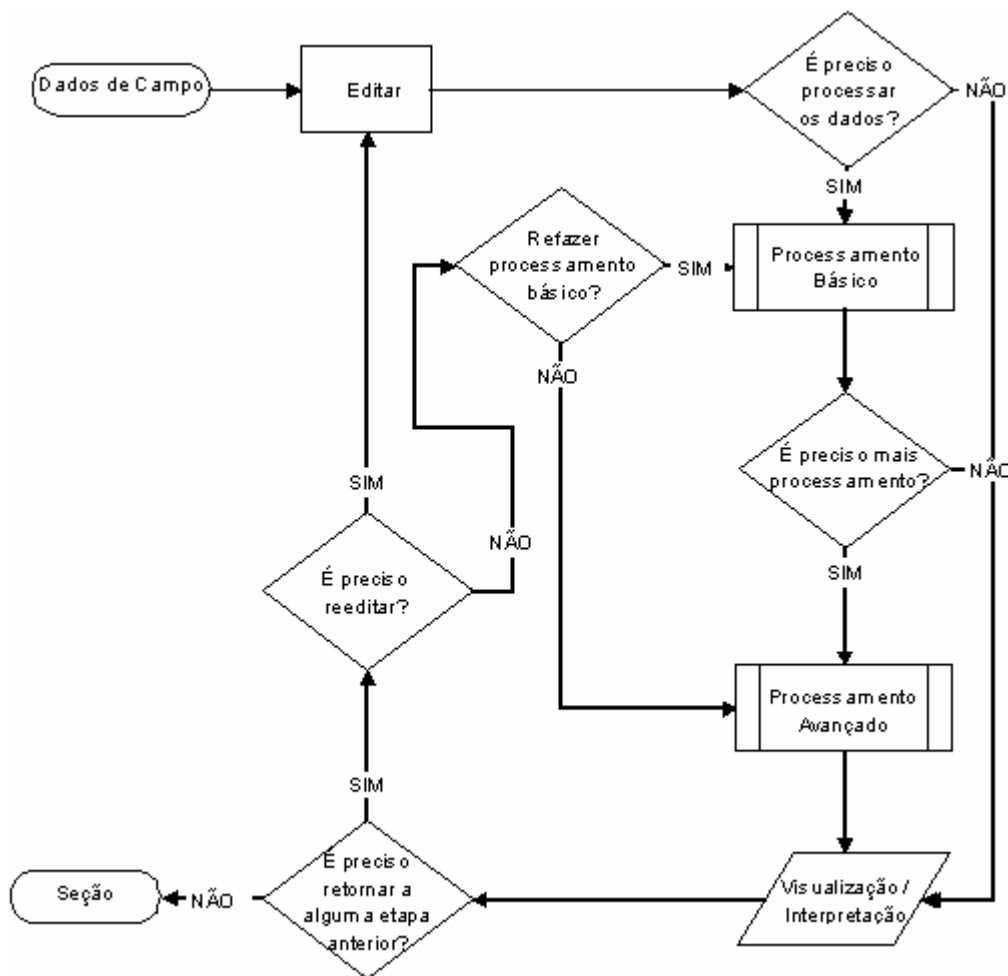


Figura 2.8 – Fluxograma das etapas de processamento dos dados de GPR

Após a aquisição dos dados, o primeiro passo no processamento é a edição dos dados. A edição permite manipular os dados para melhorar a apresentação, reverter a direção do perfil, incluir as informações da topografia, editar os traços, corrigir o tempo zero da chegada da onda, entre outros.

A etapa de processamento básico inclui a filtragem dos dados e a aplicação de ganhos. A filtragem é uma das mais simples, mas é a técnica mais potente para a análise dos dados GPR. O uso apropriado de uma filtragem pode melhorar a razão sinal/ruído, permitindo delimitar uma banda de frequência atingível pela antena (Nunes, 2002). A aplicação de ganhos tem como objetivo tentar equalizar todas as amplitudes de cada traço, a fim de compensar a atenuação sofrida pelo sinal à medida que se propaga em sub-superfície.

O processamento avançado inclui as etapas de “migração” e “deconvolução”. A migração é uma etapa importante no processamento dos dados, pois permite reconstruir uma imagem que melhor representa a sub-superfície (Sheriff, 1991). As reflexões podem ser recolocadas em suas verdadeiras posições espaciais; entretanto, o intérprete deve estar atento quanto às falsas reflexões criadas pela migração (Annan, 1993). A “deconvolução” permite remover múltiplas ou “ringing” dos dados, as quais são causadas pela ressonância da energia do radar (Nunes, 2002).

A princípio, os dados de GPR eram processados em *softwares* de sísmica, mas atualmente existem no mercado uma variedade de programas desenvolvidos para tratamento dos dados de GPR, entre eles: *RADAN*[®], da empresa *GSSI (Geophysical Survey System, Inc.)*; *GRADIX*[®], da empresa *Iterpex Limited*; *RADPRO*[®], da empresa *MalaGeoscience* e até mesmo o *GROUNVISION*[®], da empresa *Ramac*, que mesmo sendo um *software* de aquisição de dados, possui algumas ferramentas de processamento.

2.6. Interpretação dos dados

Antes de interpretar os dados, existem alguns conceitos que devem ser considerados. As duas ondas diretas, no ar e na terra, observadas freqüentemente no topo dos perfis são sempre os sinais mais fortes (vide Figura 2.7). A onda direta no ar é sempre a primeira a chegar, porque a onda EM se propaga no ar com

a velocidade da luz. A onda direta na terra, “*ground wave*”, é normalmente a segunda a chegar.

O primeiro passo na análise dos perfis é identificar a origem das reflexões e se as interfaces indicadas pelas reflexões representam mudanças na sub-superfície ou interferências. As feições identificáveis em um perfil se enquadram dentro de três classes principais: refletores horizontais contínuos, refletores de objetos de duas e três dimensões (2D e 3D) e descontinuidades laterais, hipérbolos de difrações. As interferências podem ser originadas de várias fontes: objetos na superfície (árvores de grande porte, casas e edifícios, carros, estrada de ferro e cercas metálicas), transmissores de sinais EM de alta frequência (estações de rádio FM, antena de microondas e aparelho de comunicação “*walkie-talkie*”) e ressonância da antena (Bevan, 1984; Sun & Young, 1995). Entretanto, muitas dessas feições podem ser identificadas nos perfis, sendo fundamental uma boa descrição das observações de campo.

As reflexões provenientes de objetos 2D e 3D enterrados, tais como, dutos, tanques, galerias, entre outros, são identificadas pelas suas características hiperbólicas apertadas no perfil. Já as reflexões provenientes da presença de objetos na superfície, tais como, árvores, casas, edifícios, torres de alta tensão e postes de iluminação, são caracterizadas por feições hiperbólicas abertas. A velocidade média calculada para os objetos 2D e 3D enterrados é diferente da velocidade proveniente de objetos na superfície, tornando-os facilmente distinguíveis num perfil de GPR (Annan *et al.*, 1984; Sun & Young, 1995).

A interpretação dos perfis GPR é bastante subjetiva e depende muito do intérprete. É importante que o intérprete esteja ciente dos objetivos do levantamento e tenha conhecimento sobre as propriedades elétricas do alvo e do meio encaixante. É recomendável o uso de outras fontes de informações geológicas e geofísicas para complementar os dados de GPR, aumentando-se assim, a confiabilidade da interpretação dos dados.

3 Equipamentos utilizados

Neste capítulo apresenta-se uma breve descrição dos equipamentos utilizados durante a realização dos trabalhos. A decisão de incluir um capítulo com esta descrição foi tomada em função da maior fluidez, garantida na apresentação da pesquisa desenvolvida, quando de antemão já se tem uma descrição dos equipamentos empregados. Todos os equipamentos aqui descritos pertencem ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

3.1. GPR (*Ground Penetrating Radar*)

Utilizou-se o equipamento de GPR da marca *MalaGeoscience*, modelo *RAMAC*. Em todos os trabalhos desenvolvidos foi empregada uma antena de 250 MHz blindada. A razão da escolha desta antena foi peculiar para cada trabalho e, em cada um deles, estas razões são explicitadas. A Figura 3.1 apresenta uma foto do GPR, onde é possível perceber as partes constituintes do equipamento.

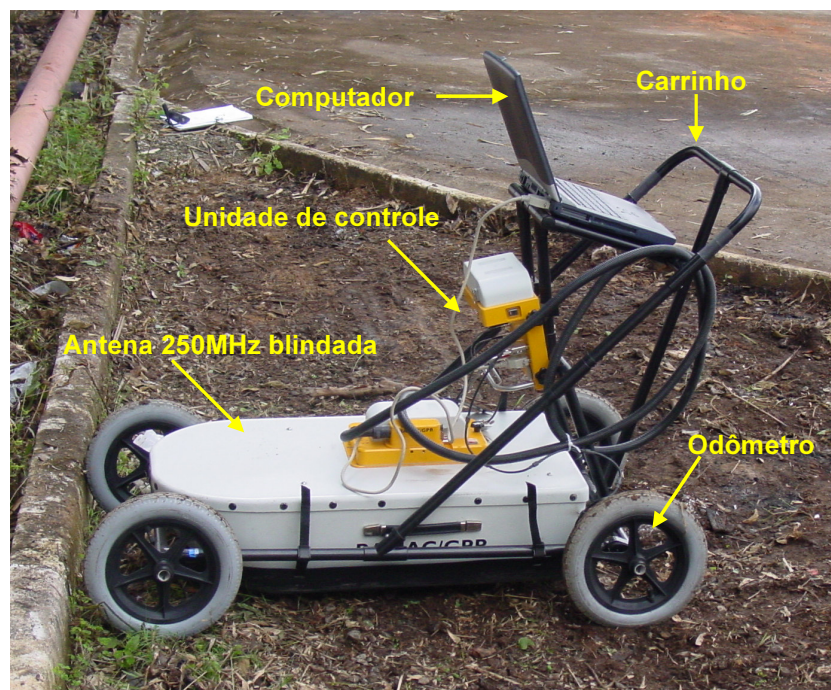


Figura 3.1– GPR e seus acessórios

A aquisição em campo é facilitada por meio do uso de um carrinho também produzido pela *MalaGeoscience*. Este carrinho, fabricado para acondicionar os acessórios do GPR, possui, acoplado em uma de suas rodas traseiras, um odômetro eletrônico. Este odômetro, diretamente ligado à unidade de controle, permite a visualização da distância percorrida na tela do computador. A utilização do odômetro facilita a medição da distância percorrida em trechos sinuosos.

A aquisição de dados deste equipamento foi realizada utilizando-se o programa *GroundVision*[®], versão 1.4.1, da *RAMAC*. Os parâmetros de aquisição (*i.e.*, número de amostras por *scan*, número de *stacks*, janela temporal e intervalo entre *scans*) são diretamente introduzidos no programa de acordo com as características de cada aquisição. Além disto, este programa permite a calibração do odômetro antes de se iniciar a aquisição de dados. O processamento dos dados adquiridos foi realizado utilizando-se o programa *RADAN*[®], versão 6, da *GSSI*. A rotina de processamento não foi uniforme e, portanto, é discutida em cada um dos capítulos que se seguem.

3.2. TDR (*Time Domain Reflectometry*)

Empregou-se um TDR da *Soil Moisture Equipment* modelo *Wintrase*. Este equipamento é normalmente utilizado para medições da constante dielétrica em laboratório, uma vez que necessita de uma alimentação de 110V. Como no campo nem sempre é acessível uma fonte elétrica com esta voltagem, foi utilizado um inversor da marca *Vector*, modelo *VEC040*, com potência de 70W para, a partir dos 12V gerados pela bateria de um veículo automotor, suprir a voltagem necessária. A Figura 3.2 mostra a constante dielétrica sendo medida utilizando-se os recursos supracitados.

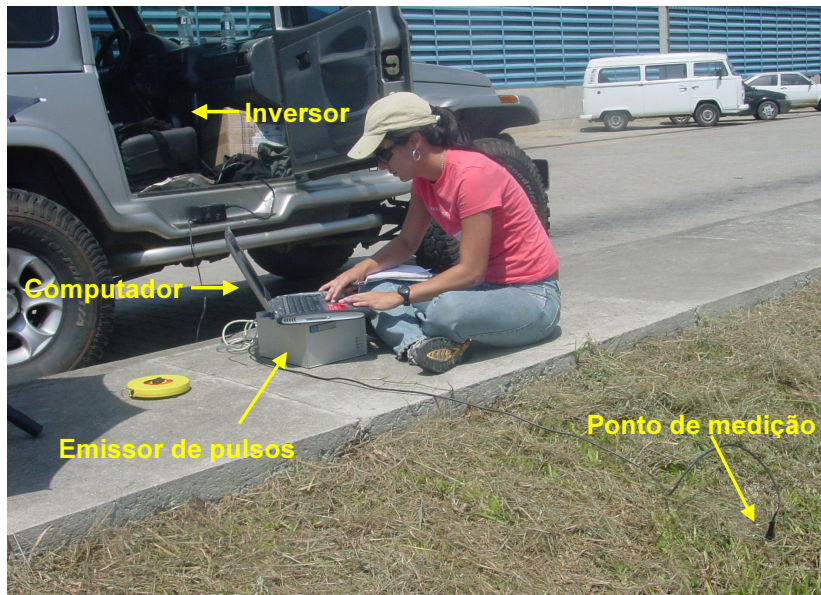


Figura 3.2 – TDR e seus acessórios

3.3. Sistema GPS geodésico

A localização dos pontos de interesse foi levantada utilizando-se um sistema GPS geodésico da marca *ASHTEC*, modelo *PROMARK II*. Nas campanhas executadas neste trabalho foram realizados levantamentos de precisão, levantamentos estáticos, utilizando-se um sistema de 2 receptores com coleta simultânea de dados brutos dos satélites por meio de 2 antenas externas. Este sistema apresenta uma exatidão máxima de 0,5cm na horizontal e 1cm na vertical. No entanto, nem sempre é possível alcançar tais magnitudes em decorrência de interferências externas (*i.e.*, presença de copas de árvores, muros, telhados). A Figura 3.3 mostra o sistema GPS geodésico com seus acessórios.

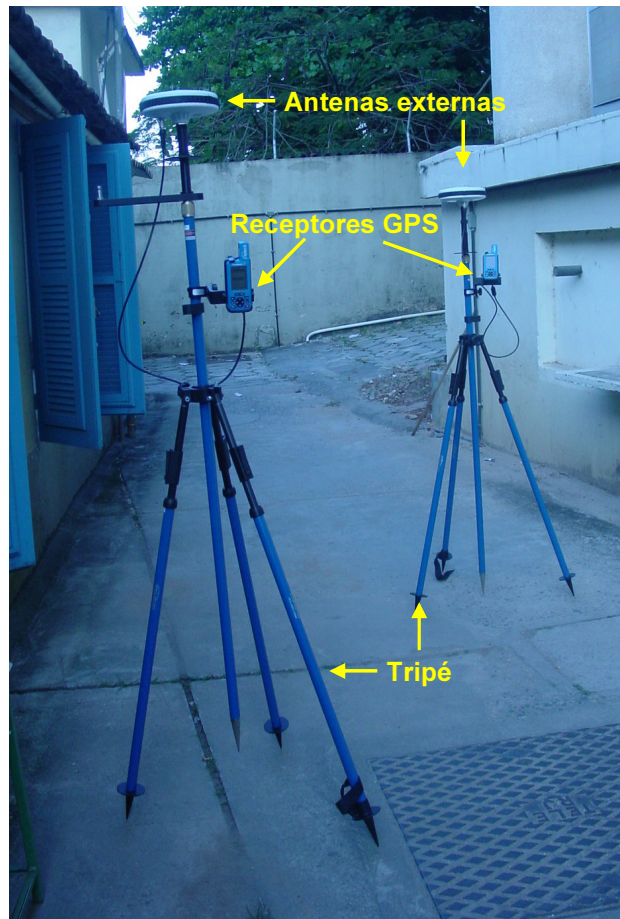


Figura 3.3 – Sistema GPS geodésico e seus acessórios

3.4. Perfuratriz

Utilizou-se uma perfuratriz hidráulica multiuso da marca Cló Zironi, modelo CT05, para a realização de algumas sondagens. A perfuração é realizada utilizando-se hastes ocas tubulares com 0,127m (5'') de diâmetro e 1m de comprimento. A medida que as hastes perfuram o terreno, a identificação do solo é realizada a partir da caracterização táctil-visual. Além disso, o trado oco permite a coleta de amostras por meio de amostradores cruzados do tipo *GEOPROBE*, *SHELBY* ou *DENNINSON*.

A Figura 3.4 mostra uma sondagem sendo executada com o auxílio desta perfuratriz. A Tabela 3.1 mostra as características da perfuratriz.



Figura 3.4 – Perfuratriz de trado oco

Tabela 3.1– Características técnicas da perfuratriz CT05

Torque max.	700 kg.m
Velocidade	13 rpm
Torre de perfuração	
Curso de avanço	1800 mm
Força de avanço	3.800 kg
Força de extração	3.800 kg
Acionamento	
Motor diesel	Agrale M 90
Potência	13 cv
Bomba hidráulica dupla	Palhetas
Pressão máxima	170 bar

4

Avaliação na caracterização da sub-superfície

O conhecimento da sub-superfície é de extrema importância para trabalhos geotécnicos; seja para a execução de fundações, projetos de escavação, trabalhos que necessitem movimentos de terra, entre outros. As técnicas normalmente empregadas para a investigação de solos e rochas constituem de sondagens diretas, amostragens e ensaios de campo. Entretanto, conforme já mencionado neste trabalho, essas técnicas fornecem informações muito pontuais e, não obstante, as condições geológicas podem se modificar consideravelmente entre dois pontos de amostragem.

Assim sendo, a técnica GPR tem sido empregada para a investigação do subsolo, fornecendo informações contínuas e de alta resolução, complementando os resultados obtidos com as metodologias diretas.

Muitos trabalhos têm sido realizados com este método para o conhecimento do substrato geológico, principalmente quando ocorrem contrastes bruscos, como um contato solo-rocha, tubulações e blocos enterrados, fraturas e cavidades em rochas, interfaces entre camadas argilosas e arenosas, vazios (ambiente cárstico), entre outros. Dentre estes trabalhos destacam-se os realizados por Davis & Annan (1989), Olhoef (1996), Grasmueck (1996), Liner (1997), Grandjean *et al.* (2001), Al-Fares *et al.* (2002), Nascimento *et al.* (2004).

Neste capítulo são apresentados os ensaios realizados em campo utilizando-se o método GPR com o objetivo de avaliar a sua aplicabilidade no conhecimento da sub-superfície em duas situações diferentes. A primeira, correspondente ao trabalho desenvolvido em uma base de combustíveis localizada em São Paulo-SP e a segunda, correspondente aos ensaios realizados em uma indústria mecânica situada em Nova Friburgo-RJ. Em ambas as aplicações, a técnica foi utilizada para identificar anomalias na sub-superfície assim como complementar os dados geológicos levantados em investigações diretas.

4.1. Base de combustíveis em São Paulo

A base de combustíveis estudada está localizada na região metropolitana de São Paulo, no bairro Vila Carioca. Esta base, vista na Figura 4.1, está em operação desde a década de 40. Ela possui uma área total de 188.360m², sendo a sua maioria referente à área operacional, ocupada pelas instalações de tancagem, tubulações, plataformas de recebimento e distribuição de produtos, laboratório, central de controle e oficinas de manutenção.

Segundo Rodrigues (2002), a geologia da cidade de São Paulo é constituída em linhas gerais por 4 horizontes. Na camada superior, aterros e depósitos aluviais quaternários. O segundo horizonte, Formação São Paulo terciária, é constituído por argilas vermelhas porosas sobrepostas a argilas variegadas com lentes de areia. O terceiro horizonte é composto pela Formação Rezende terciária, caracterizada pela presença de argila dura cinza esverdeada sobreposta a camadas de areias grossas e médias argilosas. Por último, a base desta estratigrafia é definida pelo embasamento cristalino caracterizado por rocha tipo gnaise.



Figura 4.1– Vista aérea da base de combustíveis

A geologia local foi obtida através da interpretação dos boletins de sondagem. O modelo geológico apresentado na Figura 4.2 compreende as seguintes camadas:

- Camada C1: Corresponde a uma camada mais superficial, composta por argila arenosa de cor marrom. Possui uma espessura variável entre 0 e 3m e inclui aterros e materiais naturais. Esta camada pode ser correlacionada com a unidade regional aterros e depósitos aluviais quaternários.

- Camada C2: Ocorre imediatamente abaixo da camada C1 e, em algumas áreas, na superfície do terreno. É composta por argilas arenosas de cor vermelha com níveis de cascalho que pode ser correlacionada com a Formação São Paulo. A espessura desta camada varia entre 0 e 3,5m.

- Camada C3: Ocorre embaixo das anteriores e, em algumas ocasiões, na superfície do terreno, especialmente na zona central da base. Pode se correlacionar com a zona inferior da Formação São Paulo (argilas variegadas). É composta na sua parte superior e inferior por argilas siltosas variegadas com espessura variável entre 0 e 5m e, na sua parte intermediária, por areias finas a grossas de cor branca com espessura variável entre 0 e 8m. O nível d'água foi detectado nesta camada nas profundidades correspondentes às camadas superior e intermediária.

- Camada C4: Corresponde à zona de alteração de rocha, ocorre abaixo das camadas anteriores e se estende como camada contínua na área toda. Possui espessura variável entre 11 e 28m.

- Camada C5: Corresponde ao embasamento da rocha sã. É descrito como um gnaise de cor cinza e se estende por toda a área.

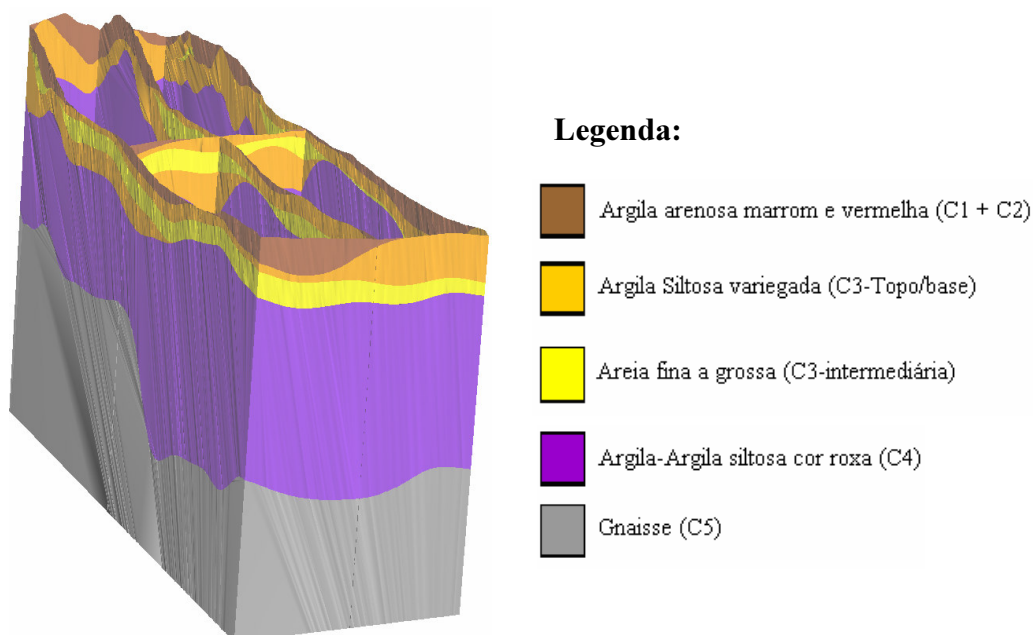


Figura 4.2 – Modelo Geológico da base de combustíveis (Araruna e outros, 2005)

A Figura 4.3 apresenta uma seção estratigráfica, construída com os dados geológicos anteriormente citados, na área onde foi realizada a investigação geofísica. A linha vermelha mostrada na Figura 4.1 corresponde à posição desta seção.

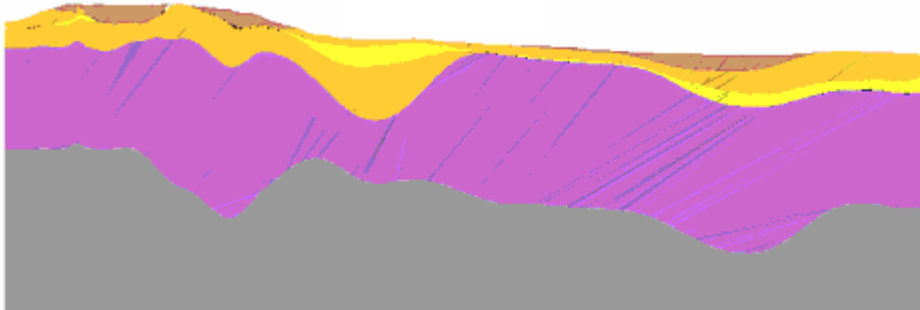


Figura 4.3 – Seção geológica longitudinal na área de investigação geofísica (Araruna e outros, 2005)

4.1.1.

Aquisição de dados

4.1.1.1.

Aquisições com o GPR

Na base de combustíveis foram selecionados alguns locais para a realização dos ensaios de acordo com a área definida para a realização de um plano de gerenciamento das águas subterrâneas. As aquisições com o GPR foram realizadas em etapas para não atrapalhar o tráfego de caminhões dentro da base.

Os ensaios foram realizados com uma antena blindada na frequência central de 250MHz. Neste caso, a escolha desta antena foi feita em função da facilidade e rapidez de execução, além de ser adequada para atingir a profundidade na qual as tubulações estavam enterradas. Durante a aquisição de dados foi utilizado o programa *GroundVision*[®] onde foram adotados os seguintes parâmetros:

- número de amostras por *scan* (traço) – 995;
- número de *stacks* (empilhamento) – 4;
- *range* (janela temporal) – 200ns;
- intervalo entre *scans* (traços) – 0.02m;
- sem ganho;
- nenhuma filtragem.

Foram traçados diversos perfis dentro da área previamente demarcada e, com o auxílio do GPS, foram coletadas as coordenadas dos pontos iniciais e finais de cada um destes perfis. A Figura 4.4 mostra a aquisição de um perfil GPR sendo feita com o georadar.



Figura 4.4 – Aquisição com o GPR na base de combustíveis em São Paulo-SP

4.1.1.2. Determinação da constante dielétrica no meio

O valor da constante dielétrica do solo (k) foi medido em campo por meio do equipamento de reflectometria no domínio do tempo (TDR). A Figura 4.5 mostra o valor da constante dielétrica sendo medido.



Figura 4.5 – Constante dielétrica sendo medida na base de combustíveis

Foram medidos os valores da constante dielétrica em alguns pontos distribuídos na área da base de combustíveis. De acordo com o modelo geológico apresentado (vide Figura 4.2), a aquisição geofísica foi realizada sobre três camadas: C1, C2 e C3. Entretanto, somente foi possível medir a constante dielétrica do material C2, uma vez que este material estava presente em alguns taludes na Base de combustíveis. Não foi possível realizar as medições nos materiais C1 e C3 porque estes materiais estavam recobertos ou com pavimento asfáltico ou com concreto ou ainda, na maioria das vezes, com paralelepípedos.

Uma média aritmética foi calculada a partir de 3 medições realizadas na camada C2 cujo resultado forneceu o valor 9. Este valor foi portanto adotado para a constante dielétrica do solo.

4.1.2. Processamento dos dados

Todos os radargramas obtidos foram processados utilizando-se os mesmos recursos de processamento. Primeiramente, corrigiu-se o atraso da onda direta para a posição zero e, em seguida, os dados foram filtrados com um filtro vertical, “*IIR filter*”, corta baixa de 500MHz e corta alta de 125MHz, para delimitar a faixa de frequência atingível pela antena utilizada. Uma função de ganho do tipo automática em 10 pontos foi aplicada e, na seqüência, um ganho linear foi aplicado com o objetivo de realçar as regiões de interesse. Ainda, para uma melhor visualização dos dados, utilizou-se o recurso de ajustar a escala horizontal, “*skipping*”, o qual permite especificar o número de *scans* (traços) a mostrar. E, finalmente, para conversão da escala vertical em tempo (ns) para profundidade (m), adotou-se o valor médio 9 para a constante dielétrica do solo, conforme observações e medições feitas em campo.

4.1.3. Análise dos resultados

A Figura 4.6 apresenta o perfil adquirido sobre a área de circulação da base, perfil 1. Nele é possível perceber um refletor contínuo a aproximadamente 1,60m. De acordo com o modelo geológico elaborado, este refletor se encontra em geral na interface entre as camadas C1 e a parte intermediária da camada C3, quando

não se encontra na camada C3, na interface entre sua parte superior e intermediária. Como a camada C3 está composta em sua parte intermediária por areias finas a grossas, é possível que este refletor corresponda ao lençol freático que se encontra a aproximadamente 1,20m de profundidade. Esta hipótese é corroborada pelas informações colhidas junto aos boletins de sondagem dos poços de monitoramento localizados próximo ao local onde o perfil foi traçado e que podem ser encontrados no Anexo A. Estas reflexões se repetem nos três perfis adjacentes adquiridos na base de combustível, conforme pode ser visto nas Figura 4.7 e 4.8.

Outra interface, indicada pelas reflexões a aproximadamente 3m de profundidade, também pôde ser notada nestes três perfis adjacentes. Segundo informações do modelo geológico, nesta profundidade, ocorre uma interface de materiais com diferentes propriedades elétricas. A interface ocorre na maioria das vezes entre a parte intermediária e a base da camada C3. O contraste observado pode estar relacionado ao contato da lente de areia em contraposição à argila siltosa variegada, que provavelmente provoca esta reflexão.

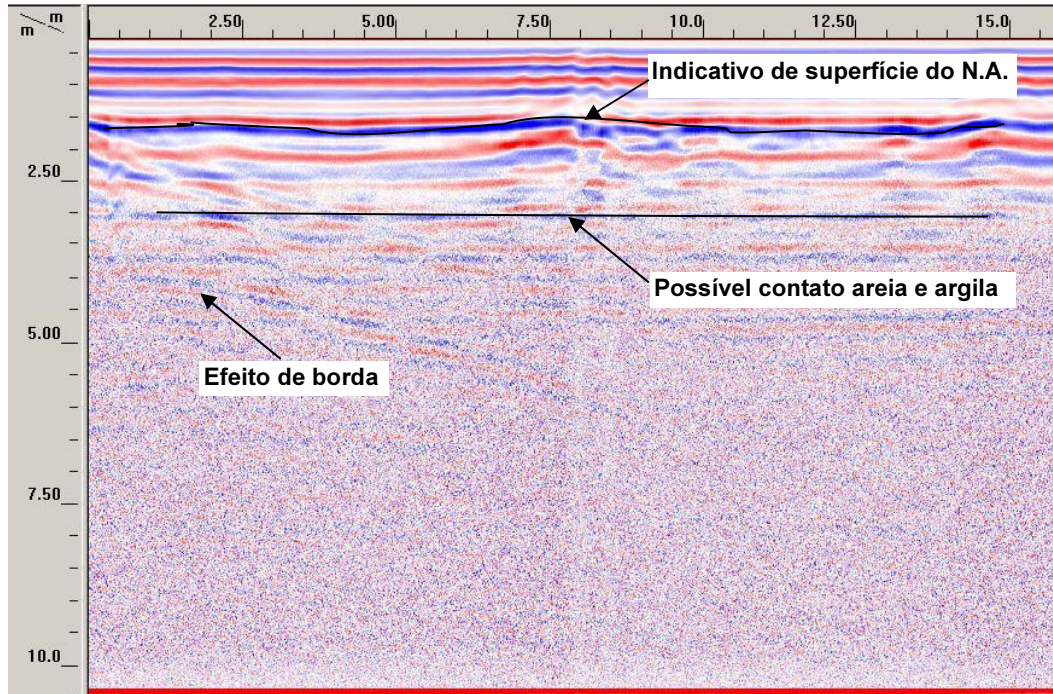


Figura 4.6 – Primeiro perfil de GPR na área de circulação da base de combustíveis

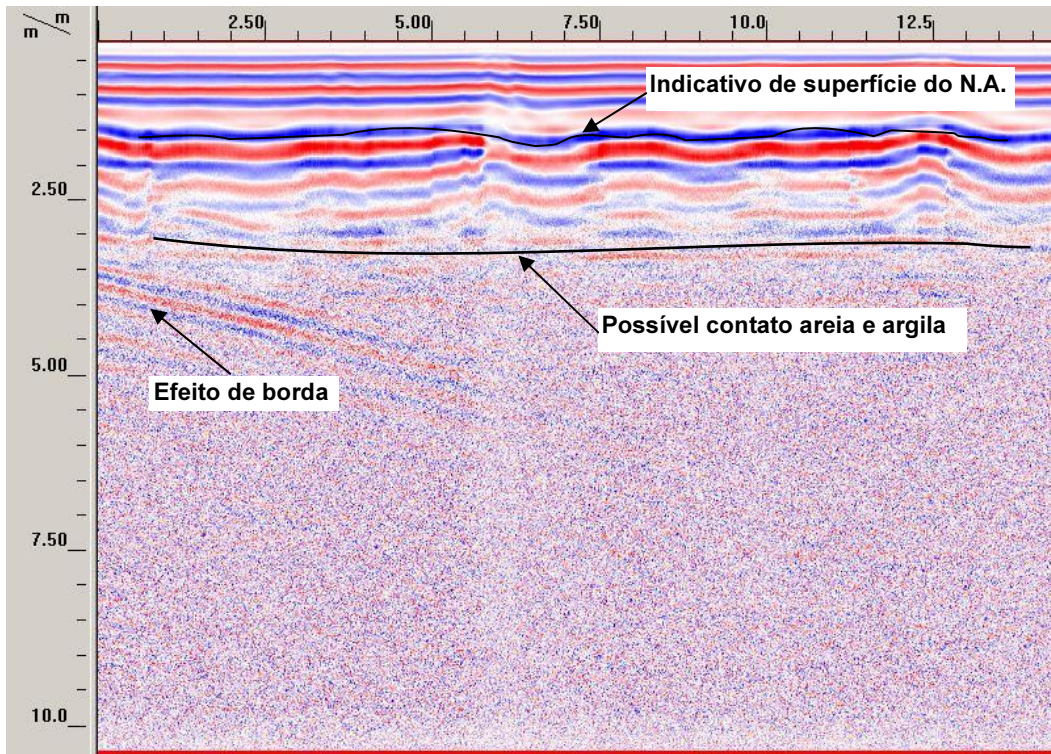


Figura 4.7 – Segundo perfil de GPR na área de circulação da base de combustíveis

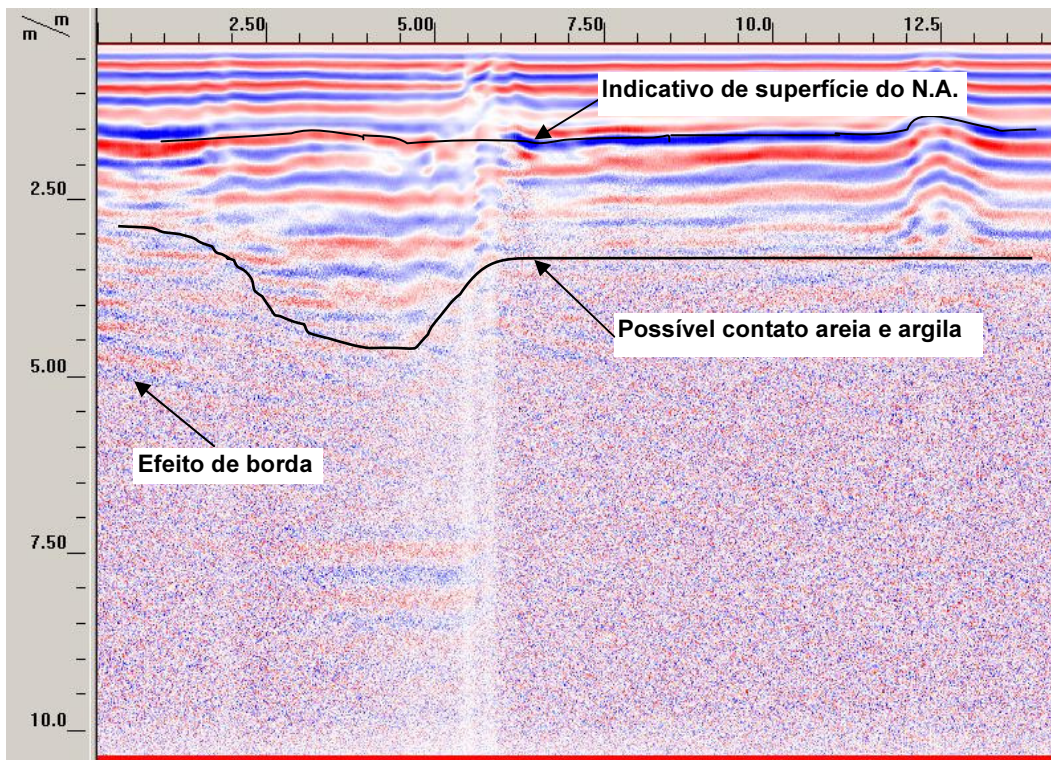


Figura 4.8 – Terceiro perfil de GPR na área de circulação da base de combustíveis

O quarto perfil, apresentado na Figura 4.9, foi adquirido próximo ao portão de entrada da base. O acesso à base possui uma ligeira declividade que exige uma frenagem dos caminhões que por ali transitam. Este processo de frenagem possivelmente provoca um amolgamento e rearranjo do solo nesta região e, as anomalias observadas no trecho inicial do radargrama, provavelmente se referem a este processo de frenagem.

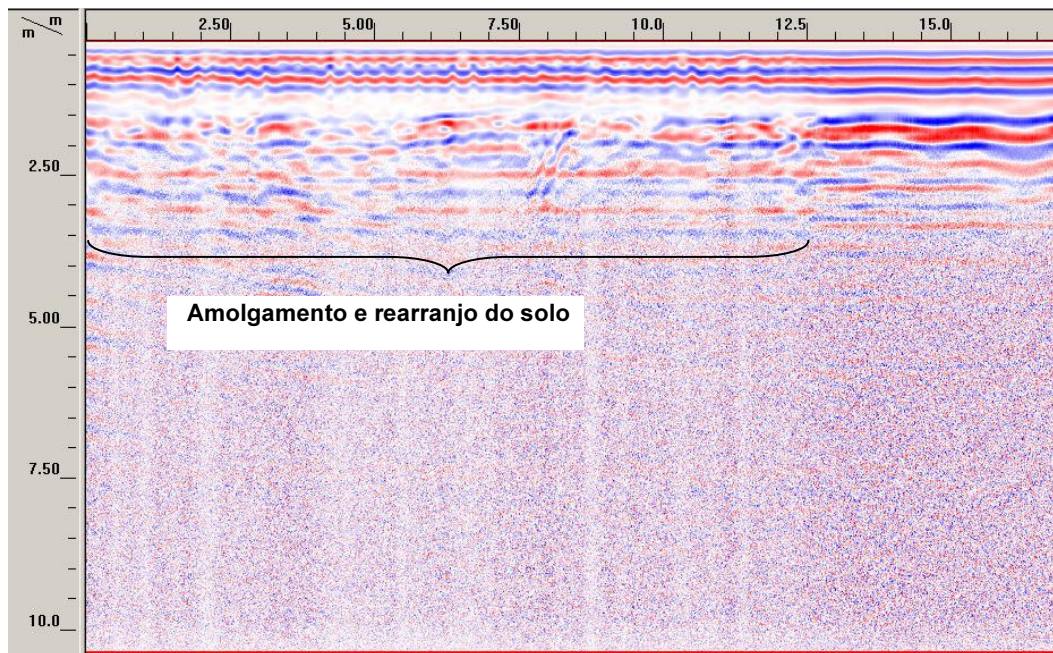


Figura 4.9 – Quarto perfil de GPR na base de combustíveis

A Figura 4.10 apresenta o radargrama adquirido próximo à área de estacionamento da base. É possível perceber uma feição hiperbólica “apertada” no início do radargrama, a 1,5m da escala horizontal e a aproximadamente 1m de profundidade, e também em seu final, a 10m da escala horizontal e a aproximadamente 3m de profundidade. Como as feições provenientes de objetos 2D e 3D enterrados (*e.g.*, dutos, tanques, galerias) são caracterizadas por este tipo de feição sobre uma seção GPR, é possível que estas feições representem tubulações da base de combustíveis.

Além disso, aparentemente dois refletores estão representados nas profundidades de 1,50m e 3m. Segundo os dados do modelo geológico elaborado, nesta região o nível d’água se encontra a uma profundidade que varia entre 1,0m e 1,5m, portanto, é provável que este primeiro refletor corresponda ao nível d’água. Já o refletor localizado abaixo deste, pode se referir a um contato entre algumas

das camadas apresentadas no modelo geológico, uma interface de materiais com diferentes propriedades elétricas que, entretanto, não podem ser inferidas devido à falta de informação sobre o perfil geológico nesta exata localização.

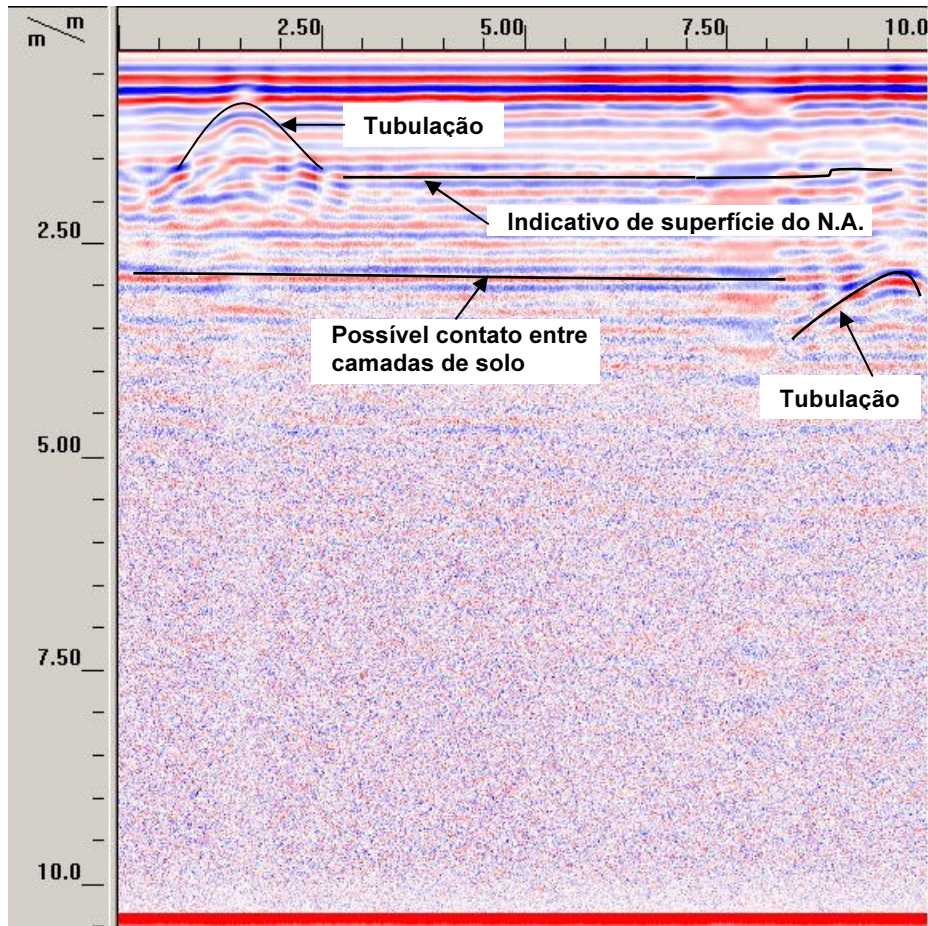


Figura 4.10 – Quinto perfil de GPR na base de combustíveis

4.2. Indústria mecânica em Nova Friburgo

O município de Nova Friburgo-RJ se caracteriza, geologicamente, pela ocorrência de rochas metamórficas e magmáticas do Pré-Cambriano, pertencentes ao Batólito Serra dos Órgãos.

No local da indústria mecânica investigada, tem-se um aterro possivelmente assentado sobre solos residuais e sedimentares quaternários que cobrem o substrato rochoso.

As sondagens executadas no local e discutidas adiante não permitem diferenciar o aterro do solo residual jovem local. Sendo fonte do aterro os solos residuais do embasamento rochoso das áreas adjacentes.

4.2.1. Aquisição de dados

4.2.1.1. Aquisições com o GPR

Foram realizados ensaios GPR em alguns locais dentro da indústria. A Figura 4.11 mostra um diagrama da indústria mecânica com a localização e direção destes perfis GPR. As aquisições foram realizadas em uma única etapa utilizando-se o programa *GroundVision*[®] onde foram adotados os seguintes parâmetros:

- número de amostras por *scan* (traço) – 995;
- número de *stacks* (empilhamento) – 4;
- *range* (janela temporal) – 200ns;
- intervalo entre *scans* (traços) – 0.02m;
- sem ganho;
- nenhuma filtragem.

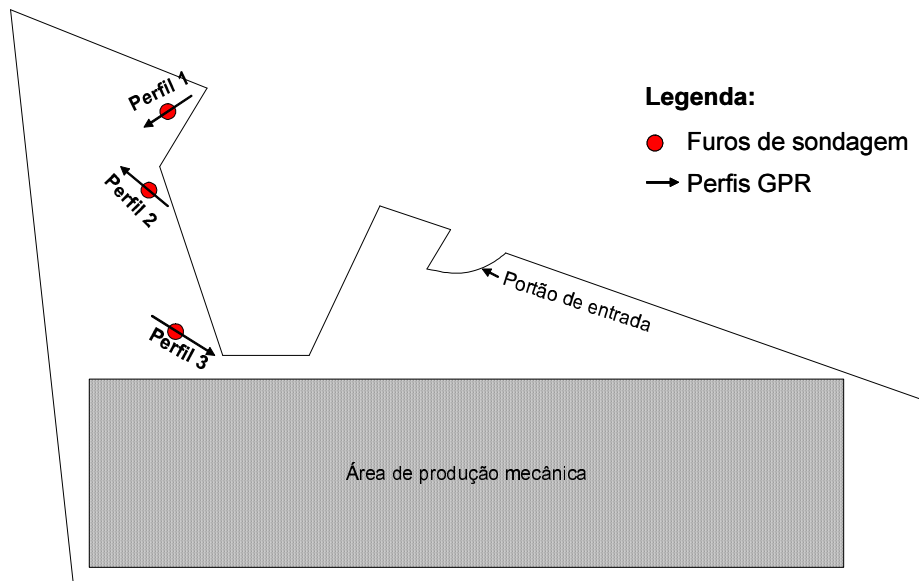


Figura 4.11 – Lay out da indústria mecânica com a localização e direção dos perfis GPR e das sondagens

4.2.1.2. Sondagens

Para auxiliar na interpretação dos radargramas adquiridos, foram executados alguns furos de sondagem nos locais onde foram feitas as aquisições com o GPR. Estes furos de sondagem foram perfurados utilizando-se a perfuratriz de trado oco, que permitiu a identificação dos materiais à medida que os furos fossem avançando. A Figura 4.12 mostra um furo de sondagem em execução.

As descrições dos materiais são apresentadas nas análises dos resultados para facilitar a compreensão e desenvolvimento do trabalho.



Figura 4.12 – Furo de sondagem sendo perfurado com o auxílio da perfuratriz

4.2.2. Processamento dos dados

Assim como descrito no item 4.1.2, os dados adquiridos foram processados utilizando-se o programa *RADAN*[®], sendo que, em todos perfis os mesmos recursos de processamento foram adotados. Corrigiu-se o atraso da onda direta para a posição zero e, em seguida, os dados foram filtrados com um filtro vertical, “*IIR filter*”, corta baixa de 500MHz e corta alta de 125MHz, para delimitar a faixa de frequência atingível pela antena utilizada. Uma função de ganho do tipo automática em 10 pontos foi aplicada e, na seqüência, um ganho linear foi aplicado com o objetivo de realçar as regiões de interesse. Para a conversão da escala vertical em tempo (ns) para profundidade (m), adotou-se o valor 8 para a constante dielétrica do solo, conforme observações feitas em campo e dados obtidos da literatura apresentados na Tabela 2.1.

4.2.3. Análise dos resultados

A Figura 4.13(a) mostra o primeiro perfil de GPR adquirido. Nele é possível perceber dois refletores horizontais a 1m e 2m de profundidade, respectivamente. A sondagem executada neste local e apresentada na Figura 4.13(b), mostra que existe um contato entre argila siltosa arenosa com pedregulho e silte argiloso a 1m de profundidade, e que, o lençol freático se encontra a 2,10m de profundidade. Sendo assim, certamente os refletores aparentes no radargrama se referem a este contato litológico e ao nível d'água. Além disso, são perceptíveis alguns refletores que não podem ser inferidos com os resultados da sondagem. Acredita-se que estes refletores, mostrados com linhas tracejadas na Figura 4.13(a), podem estar relacionados ao perfil de intemperismo do solo residual jovem saprolítico presente nesta região. Apesar de alguns destes refletores estarem localizados em profundidades superiores ao alcance teórico da antena empregada (4m), é possível que as condições do meio sejam propícias e as propriedades dos materiais presentes neste perfil sejam contrastantes o suficiente para a aparição de tais anomalias.

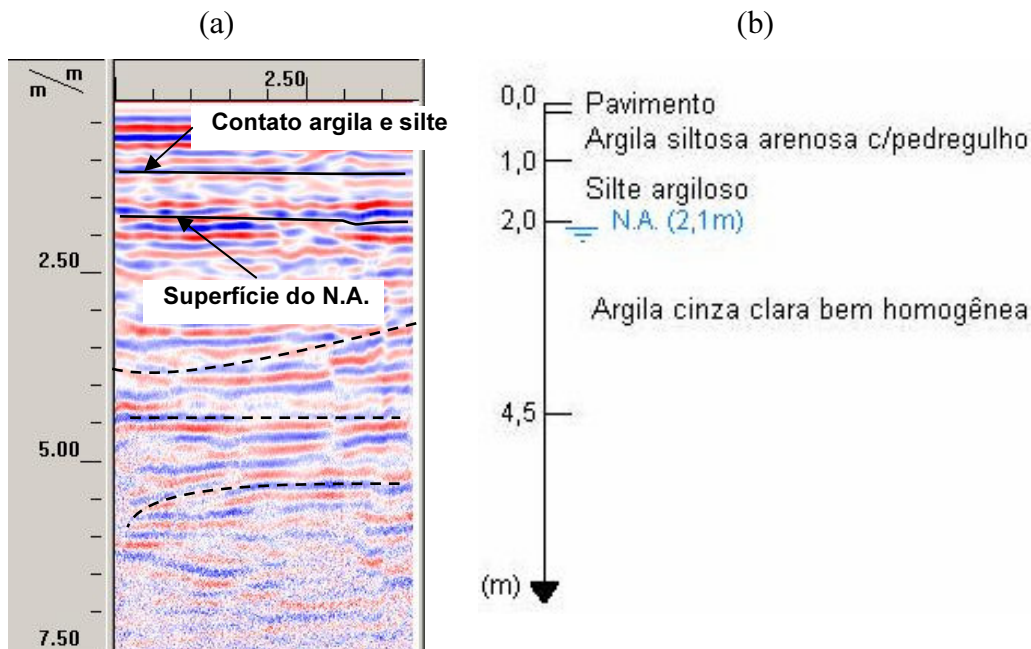


Figura 4.13 – (a) Primeiro perfil de GPR adquirido na indústria mecânica (b) Sondagem correspondente

A segunda aquisição com o GPR, realizada próxima à primeira, conforme pode ser observado na Figura 4.11, obteve um resultado bem peculiar. Da mesma forma que na primeira aquisição, foi adquirido o perfil GPR sobre a superfície pré-determinada e, na seqüência, foi realizada a sondagem para verificar as respostas obtidas com o GPR. Entretanto, logo no início da perfuração, foi constatada a presença de um tambor metálico enterrado no subsolo que inviabilizou a continuação da sondagem. A Figura 4.14 apresenta uma foto do furo no qual é possível visualizar o tambor enterrado.



Figura 4.14 – Tambor metálico enterrado no subsolo

A Figura 4.15 apresenta o radargrama referente a esta aquisição. Nele não é visível nenhuma anomalia que poderia se referir ao tambor encontrado. Talvez isso se deva ao fato do tambor estar assentado na posição vertical. Entretanto, era de se esperar que fosse detectada alguma anomalia proveniente do fundo ou da tampa do tambor. Mas durante a realização da sondagem, constatou-se que o tambor estava destampado e coberto de solo; contudo, não se tem informações sobre a existência do fundo metálico do tambor porque a sondagem foi interrompida um pouco abaixo da extremidade superior do tambor.

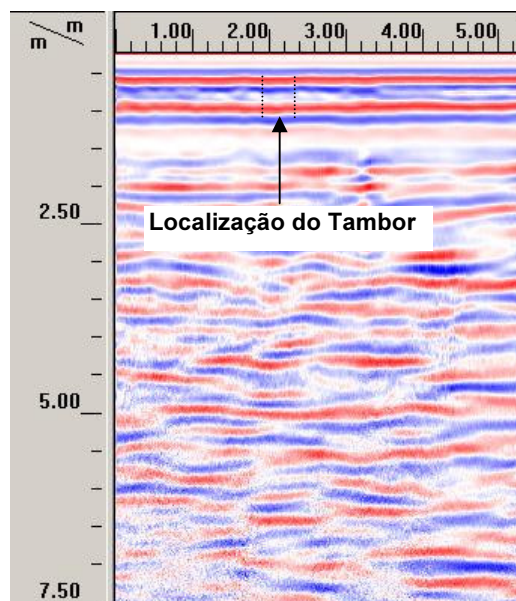


Figura 4.15 – Segundo perfil de GPR adquirido na indústria mecânica

A terceira aquisição, cuja localização está indicada na Figura 4.11, foi realizada no interior da indústria onde ficavam instaladas algumas máquinas pesadas (*e.g.*, prensa multi-estágio e retífica). A Figura 4.16(a) apresenta o radargrama correspondente a esta aquisição e a sondagem executada neste mesmo local é apresentada na Figura 4.16(b). Fazendo-se uma análise comparativa entre o radargrama e o boletim de sondagem, percebe-se a existência de alguns refletores que podem estar relacionados ao contato que ocorre a 1m de profundidade entre a argila siltosa arenosa com pedregulho e o silte argiloso e, além disso, a posição do lençol freático que se encontra a 2,4m de profundidade. Neste radargrama também são visíveis alguns refletores que não podem ser inferidos com os resultados da sondagem, linhas tracejadas mostradas na Figura 4.16(a), mas, conforme já discutido, podem se referir ao perfil de intemperismo do solo residual jovem.

A Figura 4.17 apresenta um detalhe do furo de sondagem aberto onde é possível notar a armação da laje. Como a armadura está presente nos primeiros 10cm da sub-superfície, não é possível notar sua presença no radargrama porque nesta região são muito expressivas as ondas diretas no ar e na terra, as primeiras ondas a serem captadas pela antena receptora, uma vez que percolam paralelamente à superfície do terreno, no ar e na terra, respectivamente. Possivelmente, a armadura poderia ser percebida, caso fosse utilizada uma antena que garantisse uma maior resolução da sub-superfície. Isto seria conseguido utilizando-se uma antena de maior frequência.

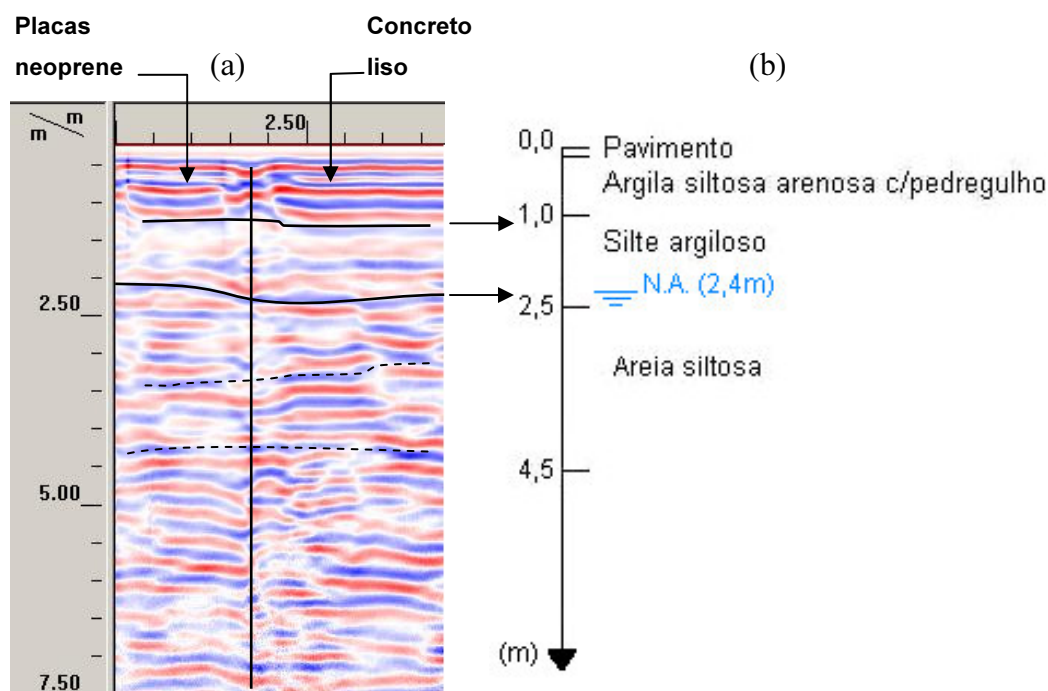


Figura 4.16 – (a) Terceiro perfil de GPR adquirido na indústria de autopeças (b) Sondagem correspondente

Além disso, na Figura 4.16(a), é nítida uma anomalia que se propaga verticalmente ao longo do radargrama. Esta anomalia, aparente aos 2,20m da escala horizontal, provavelmente se refere à mudança de revestimento do pavimento, conforme pode ser visto na Figura 4.17, passando de uma cobertura com placas de neoprene para concreto liso.



Figura 4.17 – Localização da 3ª aquisição com detalhe da ferragem aparente no furo

4.3. Considerações finais

As investigações realizadas na base de combustíveis e na indústria mecânica forneceram resultados relevantes para comprovar a aplicabilidade da técnica GPR no reconhecimento dos contatos geológicos, estruturas enterradas e posição do nível d'água. Os contrastes bruscos, tais como tubulações enterradas e lençol freático, foram facilmente identificados.

5

Avaliação na detecção de contaminação por hidrocarbonetos

A contaminação do solo e das águas subterrâneas por derivados de petróleo é uma preocupação crescente em todo o mundo e, dentre as principais fontes de contaminação destes elementos, estão os vazamentos de combustíveis.

Para a remediação destes contaminantes é necessário o conhecimento da sua localização no subsolo. E, conforme já descrito neste trabalho, as técnicas normalmente empregadas para determinar a localização destes contaminantes, constituem as técnicas de sondagem e amostragem. No entanto, estas técnicas podem criar caminhos preferenciais para a migração desses contaminantes, devendo, portanto, ser utilizadas com critério e restrição. Neste capítulo é apresentado um estudo da aplicabilidade do método GPR como metodologia complementar na investigação da contaminação do solo e da água subterrânea decorrente de vazamentos de tanques de armazenamento de combustíveis.

Diversos estudos estão sendo conduzidos com este enfoque e vêm buscando confirmar a eficiência desta metodologia na detecção de contaminação de solo e da água subterrânea por combustíveis, caracterizando a área contaminada no perfil de GPR como uma zona de “sombra”, onde a onda eletromagnética não consegue propagar-se devido à alta condutividade do meio, provocada pela interação da água com os ácidos resultantes da degradação dos compostos orgânicos pelos microorganismos, esse assunto será mais bem discutido adiante. Dentre estes trabalhos destacam-se os realizados por Daniels *et al.* (1995), Greenhouse *et al.* (1993), Sauck *et al.* (2000) e no Brasil, Aquino *et al.* (1998) e Castro *et al.* (2003).

O estudo aqui apresentado foi realizado em ambiente de campo com o intuito de aplicar a técnica às condições naturais reais. O trabalho desenvolvido consistiu na caracterização geológica e hidrogeológica para verificar a existência de contaminação que poderia estar presente no solo na zona vadosa.

5.1. Descrição do meio físico

Uma das áreas estudadas nesta pesquisa compreende uma antiga área de tancagem que foi transformada em uma base de armazenamento e distribuição de combustíveis. Esta base, situada na cidade de Santos Dumont – MG, geologicamente está inserida no contexto da Faixa Ribeira, Domínio Tectônico Andrelândia, constituído por rochas metassedimentares do Ciclo Depositional Andrelândia com intrusões de metabasitos mesoproterozóicos (Araruna e outros, 2004).

O local de estudo se caracteriza pela presença de solo residual jovem proveniente da alteração de rochas gnáissicas do embasamento presente, especialmente, nos morrotes que ocorrem na região, além de uma pequena planície aluvionar resultante da ação pretérita do córrego vizinho à base. Portanto, a área do terreno distingue-se pela variação de solo residual com espessuras superiores a 10m e características reliquias da rocha de gnaiss para o solo aluvionar, na sua porção mais setentrional.

A área sofreu uma intensa atividade antrópica em sucessivos episódios de sua evolução. Inicialmente compondo o leito do referido córrego, que determinou a presença de material aluvionar em posição estratigráfica inferior, a área sofreu um aterro inicial e funcionou como pátio de manobras e limpeza de vagões da Rede Ferroviária Federal (RFFSA). Em uma data posterior, a área do terreno recebeu um novo aterro constituído de saibro proveniente de áreas vizinhas, o que implicou em uma camada espessa de material silto-arenoso compactado, em desnível com o leito do córrego adjacente.

A base apresenta uma área de 8.095m² e contém seis tanques de armazenamento de combustível e um de armazenamento de água para combate a incêndios. As Figura 5.1 e 5.2 mostram uma foto das instalações da área estudada e sua respectiva planta de situação que apresenta uma vista dos tanques assentes na bacia de contenção.



Figura 5.1 – Foto da base de combustíveis em Santos Dumont-MG

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310976/CA

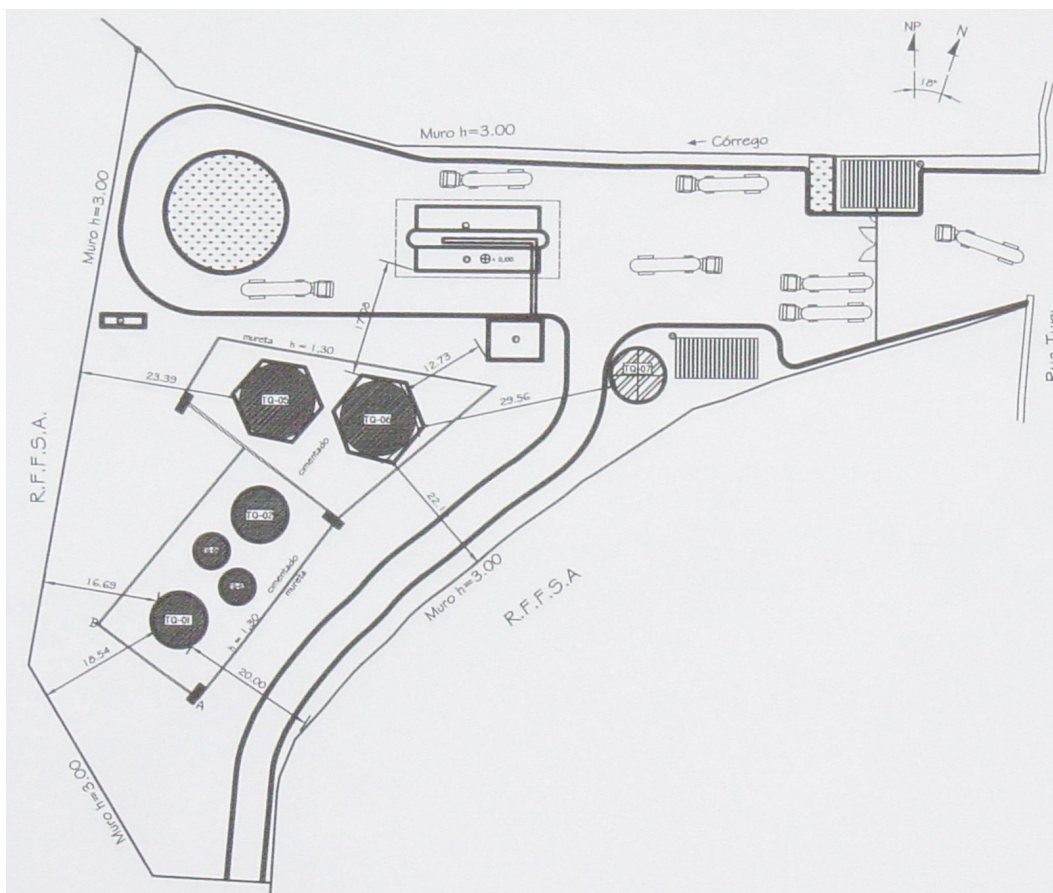


Figura 5.2 – Planta de situação da base de combustíveis

5.2.Aquisição de dados

Na área da base de combustíveis foram selecionados alguns locais para a realização dos ensaios de acordo com a provável direção do fluxo de água subterrânea. A primeira região ficava na direção da entrada da base, a jusante da suposta fonte de contaminação segundo a direção do fluxo subterrâneo; já a segunda região, ficava a montante desta fonte de contaminação.

Foram realizados ensaios GPR e sondagens diretas com a finalidade confirmatória da presença de contaminantes orgânicos.

5.2.1.Aquisições com o GPR

Os ensaios foram realizados com uma antena de 250MHz blindada. Esta frequência central de antena foi escolhida por propiciar uma boa penetração do sinal, profundidade de aproximadamente 4m, além de ser blindada não sofrendo assim a interferência de ruídos externos.

Com este georadar foram adquiridos vários perfis em diversas direções conforme pode ser visto na Figura 5.3. O primeiro deles, com o objetivo de determinar uma interface entre a região não contaminada e a região contaminada. O segundo a fim de confirmar a hipótese do primeiro teste. E, finalmente, para comparar as respostas dos sinais em regiões provavelmente contaminadas e não contaminadas foram realizados os perfis 3, 4, 5.

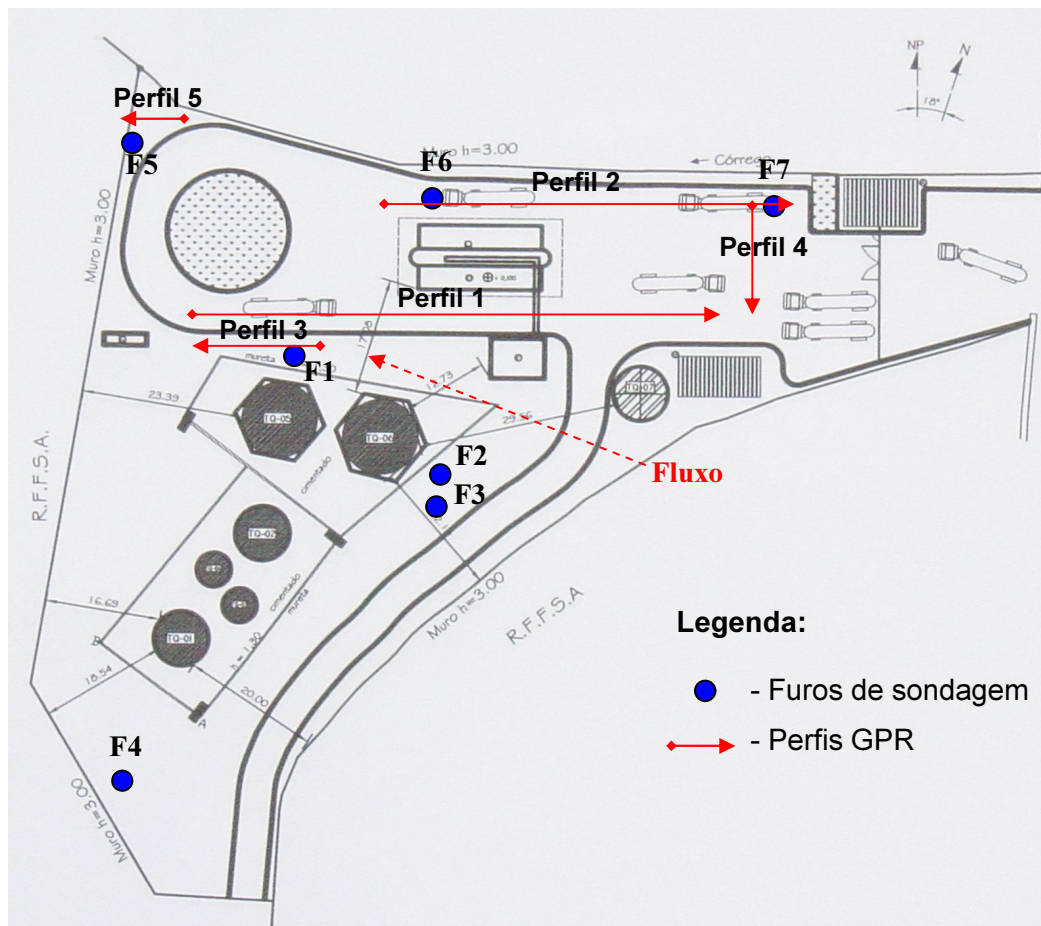


Figura 5.3 - Planta de situação com a direção dos perfis GPR e localização dos furos de sondagem

Para a maioria dos perfis foram adotados os seguintes parâmetros de aquisição de dados, com exceção do teste 1, onde adotou-se janela temporal de 280ns:

- número de amostras por *scan* (traço) – 512;
- número de *stacks* (empilhamento) – 4;
- *range* (janela temporal) – 200ns;
- intervalo entre *scans* (traços) – 0.02m;
- sem ganho;
- nenhuma filtragem.

A Figura 5.4 mostra a aquisição de um perfil GPR sendo feita com o georadar.



Figura 5.4 – Aquisição com o GPR na base de combustíveis em Santos Dumont-MG

5.2.2. Sondagens

Para poder avaliar o resultado obtido e auxiliar na interpretação dos radargramas da área estudada, foram executados furos de sondagens em pontos estrategicamente distribuídos na área sujeita a contaminação indicada pelo modelo conceitual. Com o auxílio da perfuratriz de trado oco foi permitida a identificação dos materiais à medida que o furo fosse avançando, conforme pode ser visto na Figura 5.5. A localização dos furos pode ser visualizada na planta apresentada na Figura 5.3. Os boletins de sondagem obtidos podem ser encontrados no Anexo B.1. A coleta de amostras de solo e de água subterrânea em alguns destes furos seria muito interessante, uma vez que tornaria possível a realização de uma caracterização física e química e, conseqüentemente, auxiliaria nas interpretações. Entretanto, a amostragem não foi autorizada pelo proprietário da base.



Figura 5.5 – Sondagem sendo realizada

5.2.3. Direção do fluxo de água subterrânea/gradiente hidráulico

A direção do fluxo de água subterrânea e o gradiente hidráulico foram determinados através de um programa computacional, *OnSite OnLine Tools for Site Assessment* (EPA, 2004), a partir das coordenadas UTM dos furos de sondagem, e da posição (profundidade) do nível d'água em cada furo de sondagem. A planilha de dados pode ser encontrada no Anexo B.2. Os resultados obtidos foram:

- Gradiente hidráulico: $i = 4,73 \times 10^{-5}$
- Direção do fluxo = $93,07^{\circ}N$

5.3. Processamento dos dados

5.3.1. Dados do GPR

Todos os radargramas obtidos foram processados utilizando-se os mesmos recursos de processamento. Primeiramente, corrigiu-se o atraso da onda direta para a posição zero e, em seguida, os dados foram filtrados com um filtro vertical,

“*IIR filter*”, corta baixa de 500MHz e corta alta de 125MHz, para delimitar a faixa de frequência atingível pela antena utilizada. Uma função de ganho do tipo automática em 08 pontos foi aplicada e, na seqüência, um ganho linear foi aplicado com o objetivo de realçar as regiões de interesse. Ainda, para uma melhor visualização dos dados, utilizou-se o recurso de ajustar a escala horizontal, “*skipping*”, o qual permite especificar o número de *scans* (traços) a mostrar. Finalmente, para conversão da escala vertical em tempo (ns) para profundidade (m), adotou-se o valor 8 para a constante dielétrica do solo, conforme observações feitas em campo e dados obtidos da literatura apresentados na Tabela 2.1.

5.3.2. Dados das sondagens e GPR

De posse dos resultados desta campanha de sondagem e das observações de contaminação realizadas durante as investigações, foi possível elaborar um modelo tri-dimensional das estruturas geológicas e de contaminação da base com o auxílio do programa computacional GOCAD, um programa de geração de sólidos tri-dimensionais de representação de estruturas geológicas complexas, que incorpora, entre outras ferramentas, pacotes geoestatísticos.

O modelo, apresentado na Figura 5.6, foi confeccionado através de interpolações obtidas por krigagem ordinária.

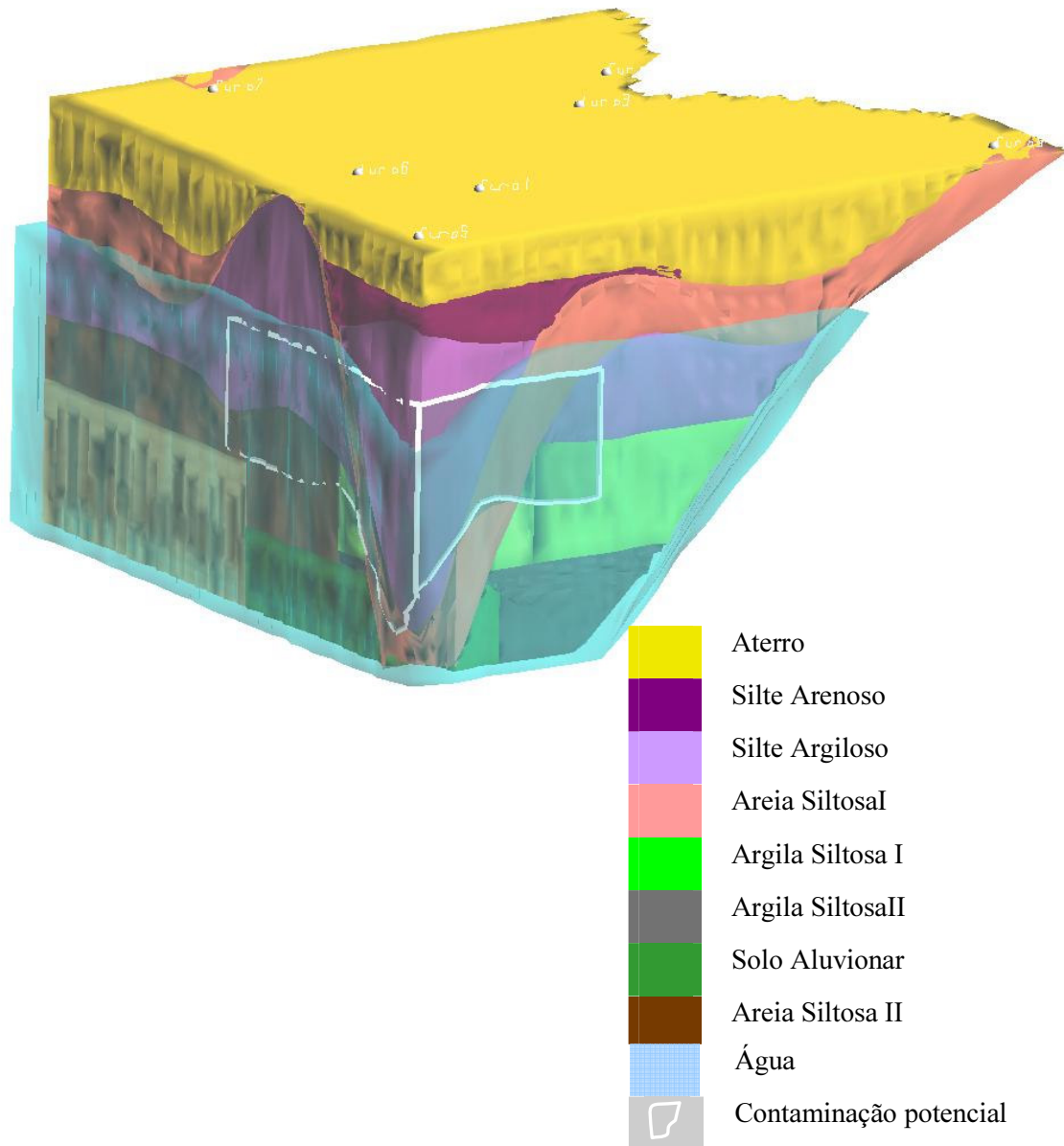


Figura 5.6 – Modelo tri-dimensional da estrutura geológica e contaminação (Araruna e outros, 2004)

5.4. Análise dos resultados

A análise conjunta de dados de furos de sondagens com os dados dos levantamentos geofísicos é necessária para a interpretação adequada dos dados geofísicos. A seguir são apresentados e analisados os radargramas processados obtidos na base de combustíveis.

Na Figura 5.7 é apresentado o perfil adquirido sobre a área de acesso da base, perfil 1, conforme pode ser vista sua localização na Figura 5.3. Nele é possível perceber que as reflexões nos primeiros 10m possuem um padrão diferente do restante do perfil. Isso se deve a mudança de pavimento que ocorre nesta região. No trecho inicial o solo é revestido superficialmente por uma camada de concreto liso mudando para piso sextavado de concreto pré-moldado no trecho final. A irregularidade na superfície ocasionada por desníveis dos blocos encaixados ocasiona esta maior irregularidade nas reflexões. Também é nítido que o sinal refletido da onda eletromagnética está bem atenuado nos 30m iniciais do radargrama.

Segundo os trabalhos desenvolvidos e apresentados por Sauck *et al.* (1998), a introdução de hidrocarbonetos no subsolo gera, inicialmente, baixos valores de condutividade elétrica, ou seja, altos valores de resistividade elétrica. No entanto, o processo de biodegradação acarreta a produção de ácidos orgânicos que lixiviam sais inorgânicos do solo. Adicionalmente, a atividade microbiana leva à produção de ácido carbônico na zona vadosa, que também irá produzir uma lixiviação inorgânica. Os resultados de tais processos biológicos e químicos é o desenvolvimento de uma pluma eletricamente condutiva na água subterrânea. Esta maior condutividade reflete numa “zona de sombra”, região mais atenuada, no sinal do radar. Entretanto, esta resposta não seria observada nos primeiros estágios de contaminação, uma vez que as reações não tiveram tempo suficiente para ocorrer. Acredita-se, portanto, que esta atenuação observada nos primeiros 30m do radargrama pode ser decorrente da presença de contaminação oriunda de vazamento de combustíveis dos tanques de armazenamento.

Todavia, uma outra hipótese também pode ser levantada. Foi constatada a presença de um material muito poroso, identificado como escória, que estava preenchido com óleo quando foi encontrado durante a execução dos furos de sondagem, conforme pode ser visto na Figura 5.8. Devido à ausência de informações sobre a composição física e química deste material, torna-se difícil afirmar se o mesmo poderia ser o causador desta atenuação do sinal. Portanto, é possível que a presença de hidrocarbonetos seja o causador da atenuação do sinal e/ou a presença da escória com seus poros preenchidos de óleo.

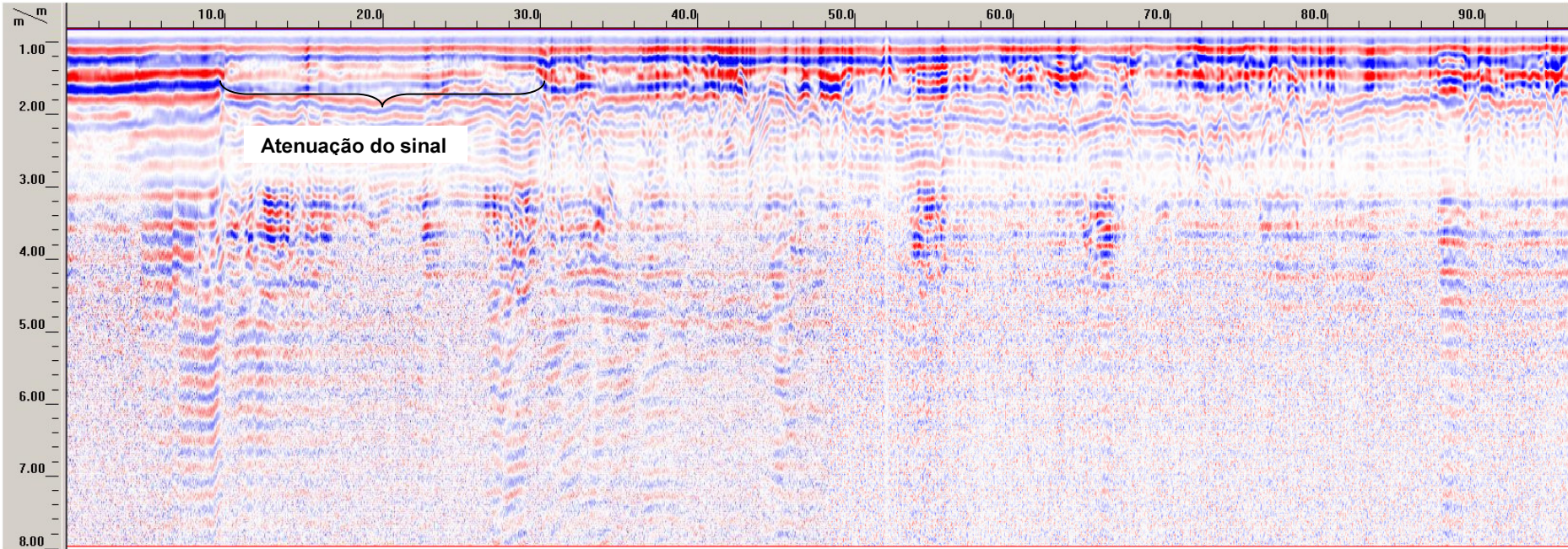


Figura 5.7 – Primeiro perfil de GPR na base de combustíveis



Figura 5.8 – Escória preenchida com óleo encontrada durante furo de sondagem

A Figura 5.9 mostra dois *scans* retirados do perfil 1, o primeiro na região mais atenuada e o segundo na região menos atenuada. A maior condutividade do solo na primeira situação pode ser mais uma vez observada devido à menor amplitude do sinal.

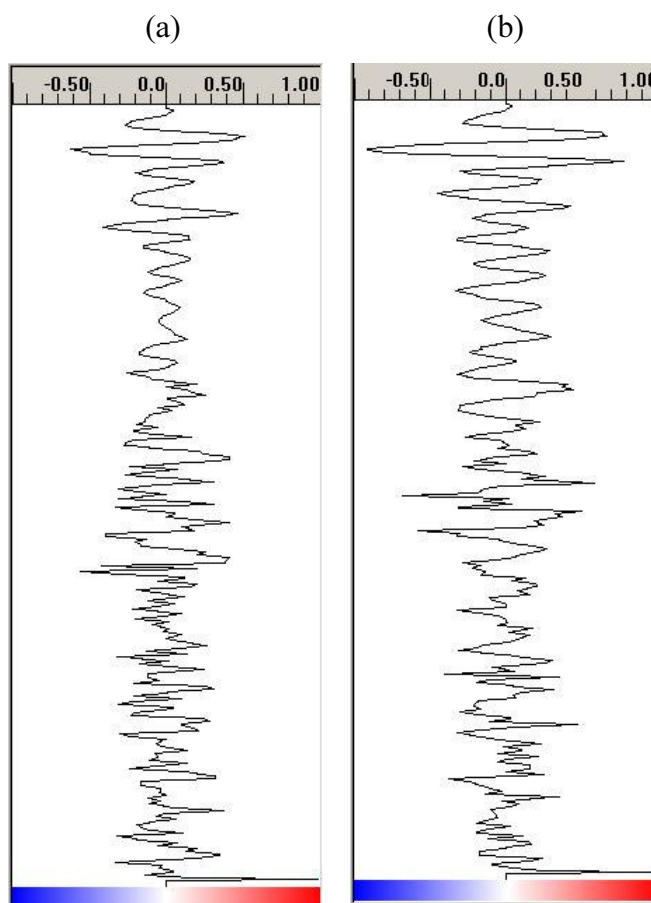


Figura 5.9 – Scans do perfil 1: (a) Região atenuada (b) Região não atenuada

O segundo perfil, realizado com o mesmo propósito do primeiro, vem confirmar as hipóteses levantadas, conforme mostra a Figura 5.10. A região mais atenuada encontra-se nos primeiros 25m, voltando a ficar mais nítida no final da seção quando se afasta da fonte de contaminação, segundo a direção do fluxo subterrâneo. Porém, mesmo com a atenuação presente em parte do radargrama, é possível perceber dois fortes refletores horizontais nas profundidades aproximadas de 2,90m e 3,50m. Como não se tem conhecimento sobre as propriedades físicas e químicas da escória, nem mesmo sobre sua distribuição espacial no terreno, pode ser que estas reflexões correspondam à camada preenchida com este material, conforme pode ser visto no boletim de sondagem correspondente ao Furo 6, apresentado no Anexo B.1. Sendo assim, se esta hipótese é verdadeira, ou seja, se os refletores correspondem à presença da escória, então, ela não é a causadora da atenuação do sinal. Neste caso, a atenuação do sinal, muito possivelmente, corresponderia somente à presença de hidrocarbonetos.

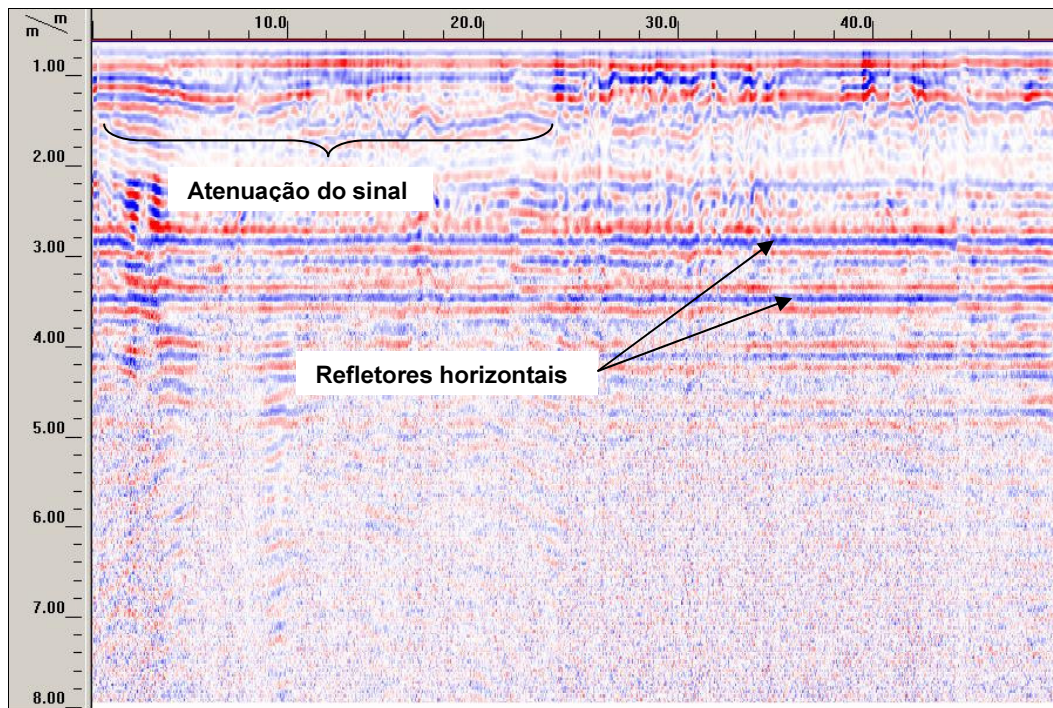


Figura 5.10 – Segundo perfil de GPR na base de combustíveis

A Figura 5.11 apresenta o radargrama adquirido próximo a linha do perfil 1, na região que pode estar contaminada, denominado perfil 03. É possível perceber um forte refletor horizontal a aproximadamente 2m de profundidade. Esta reflexão possivelmente se refere ao lençol freático que se encontra nesta profundidade

conforme atesta o boletim de sondagem do furo 1, encontrado no Anexo B.1. Além disso, também é perceptível um refletor levemente inclinado a aproximadamente 5m de profundidade que provavelmente corresponde ao contato existente nesta profundidade entre uma camada de granulometria fina (argila siltosa) com uma camada de pedregulho localizada abaixo desta. Apesar desta feição estar posicionada numa profundidade superior ao alcance teórico da antena utilizada, foi possível identificá-la porque as propriedades elétricas destes materiais são muito diferentes ocasionando um forte contraste e permitindo assim sua visualização.

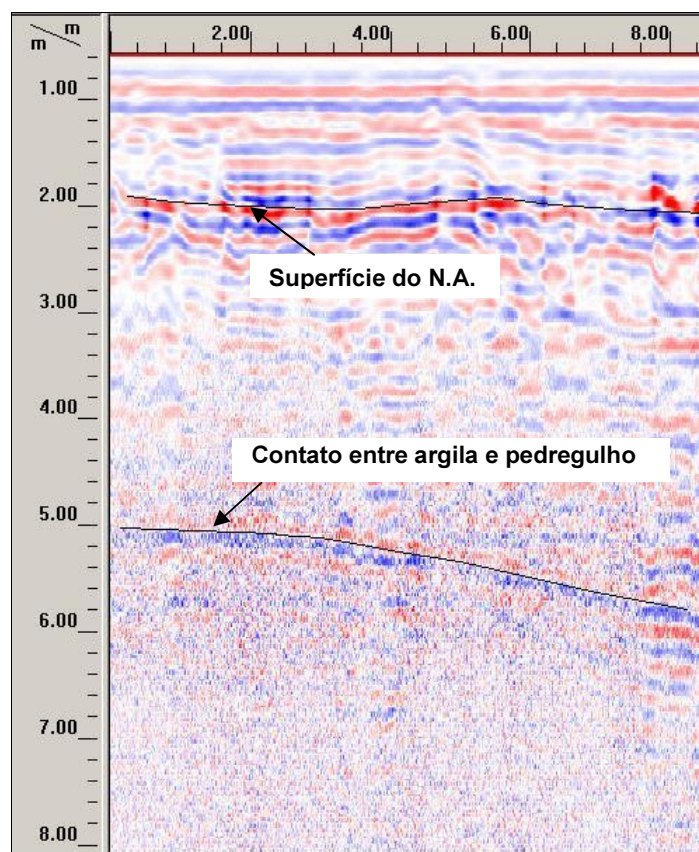


Figura 5.11 – Terceiro perfil de GPR na base de combustíveis

Foram também feitas mais duas aquisições, uma a montante da fonte de contaminação e a outra a jusante da mesma, para servir de modelo para uma análise comparativa das regiões destacadas nos perfis 1 e 2. Supondo-se que a região atenuada que aparece nos dois primeiros perfis corresponda à presença de contaminação por hidrocarboneto, então o aspecto do sinal refletido no perfil adquirido a jusante da fonte deveria ser semelhante a este. Assim, seguindo o

mesmo raciocínio, a aparência do sinal na região a montante da fonte de contaminação também deverá ser semelhante à região não atenuada nos perfis 1 e 2. As figuras que seguem referem-se aos perfis 4 e 5, adquiridos para este fim. É possível observar que o aspecto do sinal na região não atenuada nos perfis 1 e 2 se assemelha muito com o perfil 4. Já na região atenuada, apesar da superfície do terreno possuir revestimentos diferentes, nos perfis 1 e 2 ocorrem blocos de concreto sextavado enquanto no perfil 5 na superfície consta uma pequena gramínea, a semelhança também é evidente. Além disso, também é possível perceber um refletor horizontal a 1,30m de profundidade no perfil 4 que possivelmente se refere ao lençol freático, conforme boletim de sondagem do furo 7 (Anexo B.1).

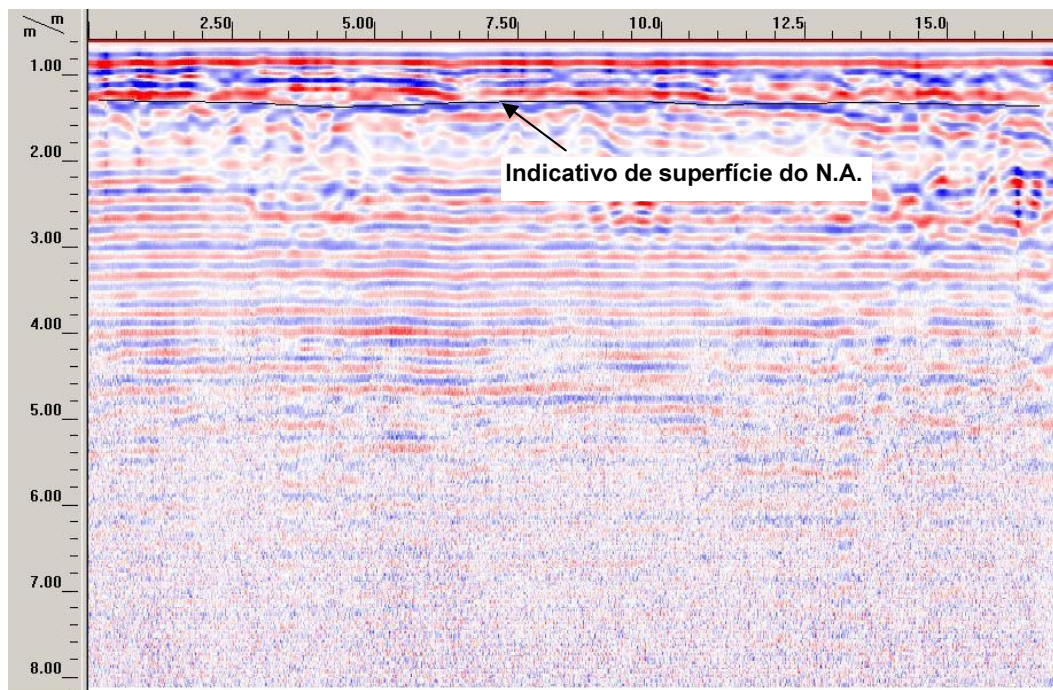


Figura 5.12 – Quarto perfil de GPR na base de combustíveis

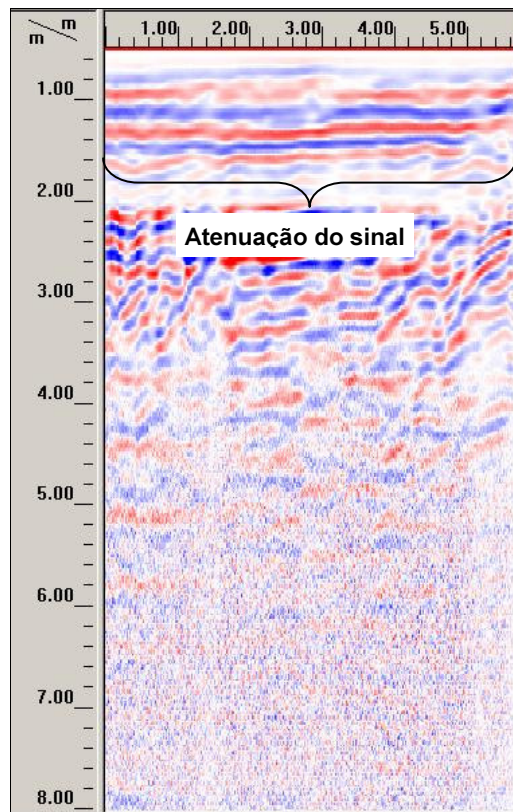


Figura 5.13 – Quinto perfil de GPR na base de combustíveis

5.5.Considerações finais

A utilização do GPR como ferramenta auxiliar na detecção de hidrocarbonetos se mostrou muito peculiar. A sua eficiência para detectar contrastes bruscos foi comprovada. Entretanto, em vista das inúmeras condições não controladas e não conhecidas aqui mencionadas, ainda não é possível confirmar sua eficiência na detecção de hidrocarbonetos.

Embora a investigação aqui realizada tenha fornecido os resultados anteriormente discutidos, ajudaria muito se algumas outras ferramentas pudessem ter sido utilizadas. O uso de um GPS geodésico para mapear com maior exatidão os pontos de investigação, fornecendo a localização e altitude dos locais de pesquisa, facilitaria o cálculo do gradiente hidráulico, além da certeza da distribuição espacial dos pontos investigados. Outra ferramenta que auxiliaria os trabalhos de processamento e interpretação dos dados geofísicos seria o uso de um TDR para a medição da constante dielétrica dos solos estudados. A deficiência no que diz respeito as incertezas nas profundidades das anomalias registradas seria desta forma suprida.

6

Avaliação na detecção de vazamentos no sistema de distribuição de água

O Parque Gráfico do Jornal O Globo, localizado no município de Duque de Caxias/RJ, fica instalado na rodovia Washington Luiz (BR-040) quilômetro 2,5, sentido Petrópolis. A Figura 6.1 apresenta uma vista aérea do Parque Gráfico onde se pode observar a proximidade de suas instalações com a Baía de Guanabara.



Figura 6.1 – Vista aérea do Parque Gráfico do Jornal O Globo (*EarthGoogle*)

A estrutura do Parque Gráfico (PG) possui uma área construída de 28.750m² que abriga todo o maquinário para impressão dos jornais além de matérias primas e produtos acabados. Em junho de 2004 foi construída uma área de lazer para os funcionários da empresa numa área adjacente à edificação do PG, situada ao norte da mesma. O empreendimento de lazer consta de um campo de futebol e um espaço coberto que abriga dependências sanitárias, churrasqueira e mesa de jogos diversos. A Figura 6.2 mostra uma vista superior da área de lazer construída.



Figura 6.2 – Vista superior da área de lazer do Parque Gráfico do Jornal O Globo

Segundo Nabuco (2004), o espaço escolhido para a construção da área de lazer funcionava como local para descarte dos materiais de escavação retirados na fase de construção do PG. Estes materiais pertenciam ao perfil de intemperismo da área construída. A regularização deste material alocado foi realizada utilizando-se uma motoniveladora, equipamento de terraplenagem normalmente utilizado para nivelamento de aterros. A compactação deste material foi realizada por meio do deslocamento de caminhões e guinchos que foram utilizados durante a fase de construção do PG, uma vez que esta área também era utilizada como canteiro de obras onde ficavam estacionados os caminhões e máquinas.

Em meados de 2002 foi constatada uma surgência de água próxima do local onde seria construído o campo de futebol. A empresa responsável pelos serviços de terraplenagem relatou que não ocorriam nascentes de água quando foram iniciados os trabalhos de construção do PG. Entretanto, quando retornaram ao local para a construção da área de lazer foi constatado este ponto de surgência de água. A área de lazer foi então construída e a água que surgia próxima ao campo de futebol foi desviada para uma canaleta de drenagem, vista na Figura 6.3.



Figura 6.3 – Surgência de água na área de lazer

Em junho de 2002, foi registrado um aumento de 100% na conta de água do PG referente ao valor médio mensal costumeiramente pago à Companhia Estadual de Águas e Esgotos – CEDAE. A partir daí, a direção do PG iniciou uma investigação à procura de vazamentos em seu sistema de distribuição de água. As tubulações metálicas de incêndio e gás foram submetidas a uma avaliação de corrosão externa provocada pelo solo e por correntes de fuga por uma empresa especializada no ramo. Segundo diagnóstico feito por esta empresa, o solo é agressivo em termos de corrosão, apresentando valores de resistividade inferiores a $6.201,50\Omega.cm$ na profundidade onde as tubulações se encontram enterradas, *i.e.* cerca de 1,5m. Amostras de solo para análise de pH também foram coletadas nos mesmos locais de medição das resistividades elétricas do solo. Os resultados das análises revelaram um solo agressivo, com pH inferior a 6, na maioria das análises. A empresa recomendou a instalação de um sistema de proteção catódica a fim de minimizar o potencial de corrosão das instalações enterradas. A rede de incêndio foi interditada e observou-se um leve declínio no consumo de água.

Diversas iniciativas foram tomadas para a investigação de vazamentos nas redes de abastecimento de água e irrigação. A realização de sondagens próximas às referidas redes foi executada em diversas ocasiões. Porém, em nenhuma delas se obteve resultados satisfatórios.

A utilização de metodologia direta para pesquisar os possíveis pontos de vazamento se torna difícil, onerosa e, na maioria das vezes, não operacional. Seria necessária a execução de um número excessivo de perfurações em todo o caminhamento da rede, em locais nem sempre disponíveis tampouco de fácil acesso.

Neste sentido, objetivou-se investigar a aplicabilidade do método geofísico de superfície, GPR, como ferramenta para detectar o suposto vazamento da rede de distribuição de água. A proposta inicial é delimitar as regiões saturadas que apresentam uma maior atenuação do sinal comparando-as com as respostas do sinal em regiões não saturadas. Uma vez mapeada a região que apresenta maior teor de umidade, o passo seguinte seria a instalação de furos de sondagem para a determinação pontual do(s) ponto(s) de vazamento.

6.1.

Descrição da geologia

A região de Duque de Caxias se caracteriza geologicamente por formações do pré-cambriano representadas por rochas metamórficas e por sedimentos quaternários. O trabalho desenvolvido por Polivanov (1998) fornece toda a descrição detalhada da geologia desta região, de onde foram retiradas as informações de interesse para este trabalho, além das observações de campo.

O Parque Gráfico (PG), construído em 1997, está assentado sobre um aterro de altura variável, estando o empreendimento com uma elevação média de 16m em relação ao nível do mar. Inicialmente, a área selecionada para a construção do parque ficava situada num morrote adjacente à BR-040, que originalmente apresentava uma variação da elevação entre +15m a +35m. Foi então realizada uma terraplenagem para regularizar e atingir a elevação de interesse. As sondagens realizadas na época e na área de implantação do Parque Gráfico indicaram um terreno constituído em linhas gerais por quatro horizontes. O mais superficial, provavelmente coluvionar/residual maduro, de textura silto argilosa ou silto arenosa com espessura variável de 2 a 7m. O segundo horizonte é constituído de solo residual jovem ou solo saprolítico de gnaiss (de textura areia siltosa, micácea ou silte areno-argilosa) com espessura variável de 2 a 6m. Abaixo deste

material ocorre um saprolito de gnaiss ou gnaiss muito alterado com espessura atingindo até 6m, que fica sobrejacente ao topo rochoso são de gnaiss.

6.2.

Aquisição de dados

6.2.1.

Aquisições com o GPR

As aquisições com o GPR tiveram que ser realizadas em diversas etapas a fim de se conseguir um bom resultado. Na época em que foi iniciada a aquisição de dados, em fevereiro de 2005, o regime de chuvas era intenso e a presença de água no solo atenuava em muito o sinal da onda eletromagnética, por tornar o meio mais condutivo. Para que pudesse ser evitada a influência da umidade oriunda da chuva nos resultados a serem obtidos, esperou-se uma estiagem mínima de 5 dias para proceder-se a aquisição dos dados.

Os ensaios foram realizados com uma antena de 250 MHz blindada. A escolha desta antena foi feita em função da rapidez e facilidade na aquisição além de propiciar uma boa penetração do sinal, profundidade de aproximadamente 4m, que atendia a profundidade de interesse. Além disto, a antena é blindada e não sofre assim a interferência de ruídos externos.

A aquisição foi realizada utilizando-se o programa *GroundVision*[®], sendo que dois conjuntos de parâmetros foram adotados:

	Conjunto 1:	Conjunto 2:
- número de amostras por <i>scan</i> (traço) -	512	968
- número de <i>stacks</i> (empilhamento) -	16	16
- <i>range</i> (janela temporal) -	180	200
- intervalo entre <i>scans</i> (traços) -	0.02	0.02
- sem ganho;		
- nenhuma filtragem.		

Estes dois conjuntos de parâmetros de entrada de dados foram testados para se avaliar qual seria a melhor resposta, uma vez que a aquisição de dados com o GPR foi realizada em etapas. A Figura 6.4 mostra um perfil GPR sendo adquirido na parte superior do talude, paralelo à rede de distribuição de água, e a Figura 6.5 mostra a localização em planta.



Figura 6.4 – Aquisição com o GPR no Parque Gráfico do Jornal O Globo

Foram realizadas diversas aquisições na parte superior do talude, aquisições paralelas e perpendiculares à direção das tubulações. Também foram adquiridos perfis GPR ao longo do talude e sobre sua berma de equilíbrio. Este talude corresponde ao elemento de separação da parte superior do PG à área de lazer. Finalmente, foram adquiridos perfis GPR em todos os lados nas proximidades do campo de futebol inclusive próximo ao ponto de surgência de água. A Figura 6.5 mostra a localização e direção dos perfis GPR que tiveram maior destaque.

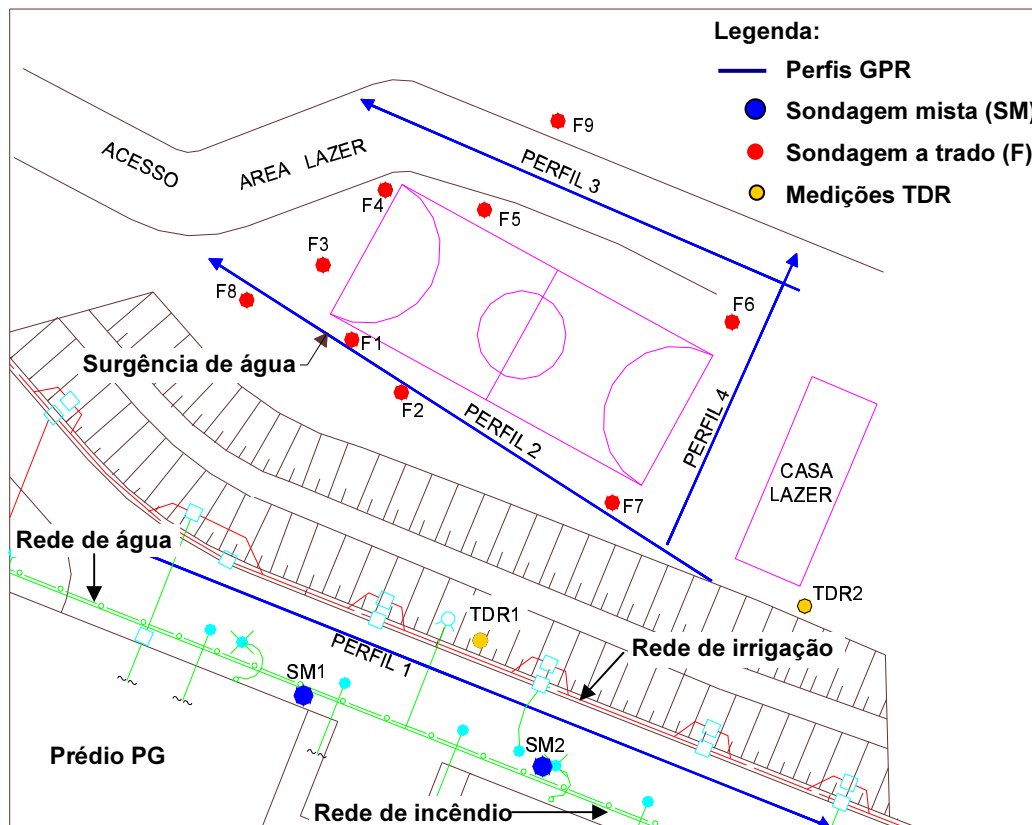


Figura 6.5 – Lay out com a localização e direção dos perfis GPR, das sondagens de Interesse e dos pontos de medição de TDR

6.2.2. Sondagens e amostragens

A empresa Tecnosolo realizou campanhas de sondagens a percussão na área de implantação do Parque Gráfico. Entretanto, não consta no relatório técnico apresentado à InfoGlobo a existência de sondagens na área de lazer. Os boletins das sondagens localizadas próximas à rede de distribuição de água estão apresentados no Apêndice C.1. A localização destas sondagens (SM) pode ser visualizada na Figura 6.5 e seus dados foram utilizados para a construção de uma seção geológica.

Para poder avaliar o resultado obtido com os radargramas da área onde ocorre a surgência de água, foram executados alguns furos de sondagens com trado manual. A profundidade de alcance destes furos foi variável, dependente da dificuldade de execução e/ou da disponibilidade de hastes. A Figura 6.5 também apresenta um esquema com a localização aproximada destes furos e no Anexo C.2 é apresentada a descrição dos materiais encontrados nestes furos.

Amostras de solo foram coletadas nas proximidades do ponto de surgência de água para análise e obtenção dos seguintes parâmetros: teor de umidade, condutividade, pH e sais solúveis. O propósito destas análises é fornecer parâmetros para uma melhor interpretação dos dados adquiridos com os levantamentos geofísicos. Os teores de umidade, apresentadas na Tabela 6.1, foram determinadas no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Já as análises de condutividade, determinação do pH e sais solúveis foram realizadas na EMBRAPA, segundo os procedimentos estabelecidos em EMBRAPA (1997). A Tabela 6.2 apresenta os resultados destas análises.

Tabela 6.1 – Teor de umidade dos solos amostrados

Amostras	Profundidade de coleta (m)	Teor de umidade (%)
Furo 1	0,42	25,5
Furo 1	0,47	15,3
Furo 1	0,80	17,1
Furo 1	1,00	18,6
Furo 1	1,90	19,7
Furo 2	0,60	29,4
Furo 2	1,10	29,9

Tabela 6.2 – Resultados das análises de pH, condutividade e sais solúveis dos solos amostrados

Amostras	Profundidade de coleta (m)	Condutividade mS/m	pH	Sais solúveis (cmol/kg)	
				Na	K
Furo 1	1,13	22	5,16	0,003	0,001
Furo 1	1,90	29	4,97	0,002	0,001
Furo 2	1,00	98	5,89	0,008	0,002
Furo 4	2,20	70	6,53	0,004	0,001

Os resultados dos teores de umidade, apresentados na Tabela 6.1, revelam um ligeiro aumento ao longo da profundidade, em ambos os furos em que foram coletadas as amostras, com exceção para a primeira amostra do furo 1, que se apresenta mais úmida. Este ponto, indicado na Figura 6.5, está localizado em uma região caracterizada pela presença de argila vermelha que possivelmente retém mais água.

Nota-se uma leve dispersão nos resultados apresentados na Tabela 6.2. Apesar da proximidade dos furos 1 e 2, conforme pode ser visto no diagrama apresentado na Figura 6.5, os valores de pH e condutividade nas amostras analisadas se mostraram bem diferentes. Esta discrepância de valores pode ser

justificada pela composição do aterro presente nesta região, pois, conforme já mencionado, a área funcionou como depósito do material excedente de escavação que ali foi depositado sem nenhum tipo de controle. Entretanto, percebe-se uma relação nos furos 2 e 4, onde valores elevados de condutividade podem estar associados a maiores concentrações de sais solúveis, conforme pode ser observado na Tabela 6.2.

6.2.3. TDR para obtenção da constante dielétrica do meio

O valor da constante dielétrica do solo (k) foi medido em campo por meio do equipamento de reflectometria no domínio do tempo (TDR). A Figura 6.6 mostra como a constante dielétrica foi medida.



Figura 6.6 – Valor da constante dielétrica sendo medido com ao auxílio do TDR

Foram medidas as constantes dielétricas em alguns pontos distribuídos na área do Parque Gráfico, na parte superior do talude e na sua base, conforme pode ser visto na Figura 6.5. Os valores adotados correspondem a uma média aritmética de 3 valores medidos em cada ponto, cujos resultados foram:

- Topo do talude: $k = 9$;
- Base do talude: $k = 10$.

Vale ressaltar que estes valores estão próximos aos valores adotados para solo residual segundo algumas literaturas, *e.g.*, Nunes (2002) onde foi adotado 13 para a constante dielétrica do solo.

6.3. Processamento dos dados

Assim como descrito no item 4.1.2, os dados adquiridos foram processados utilizando-se o programa *RADAN*[®], sendo que em todos os perfis os mesmos recursos de processamento foram adotados. Primeiramente foi feita a correção do atraso da onda direta nos dados que apresentavam este efeito. Em seguida, a aplicação de um filtro vertical “*IRR Filter*”, corta baixa de 500MHz e corta alta de 125MHz para delimitar a faixa de frequência atingível pela antena. Uma função de ganho do tipo automática em 10 pontos foi aplicada e, na seqüência, um ganho linear foi aplicado com o objetivo de realçar as regiões de interesse. Para uma melhor visualização dos dados, utilizou-se o recurso de ajustar a escala horizontal, “*skipping*”, o qual permite especificar o número de *scans* (traços) a mostrar. Finalmente, para conversão da escala vertical em tempo (ns) para profundidade (m), adotou-se o valor 9 para a constante dielétrica do solo nos radargramas adquiridos no topo do talude e 10 para os adquiridos em sua base.

6.4. Análise dos resultados

Inicialmente foi adquirido um perfil no topo do talude, denominado perfil 1, paralelo às tubulações, ao prédio do PG e aos pontos onde foram realizados os furos de sondagens SM1 e SM2, como pode ser visto no diagrama apresentado na Figura 6.5. O radargrama correspondente a esta aquisição pode ser visualizado na Figura 6.8. O objetivo desta aquisição seria identificar regiões saturadas que apresentassem uma atenuação do sinal do radar muito acentuada e, com isto, delimitar as regiões que poderiam apresentar vazamentos nas redes de distribuição, de irrigação e de incêndio. Analisando este radargrama, mesmo com a forte atenuação presente em algumas partes, pode-se notar a aparição de um refletor horizontal entre 40m e 80m da escala horizontal na profundidade de 3m. A interpretação deste refletor foi realizada com o auxílio da seção geológica

elaborada a partir dos dados de sondagem e mostrada na Figura 6.7. Nesta seção é mostrado um contato entre o aterro e o solo residual, sendo este constituído de material silto-arenoso variegado, que ocorre na profundidade de 3m nas proximidades da sondagem SM2. Este contato possivelmente corresponde ao refletor aparente no radargrama apresentado na Figura 6.8. Não é possível perceber este contato no extremo inicial do radargrama porque, conforme se pode observar na seção geológica, ele ocorre numa profundidade maior nesta região, profundidade esta não alcançada pela antena utilizada.



Figura 6.7 – Seção geológica na área do Parque Gráfico obtida com resultados de sondagem a percussão

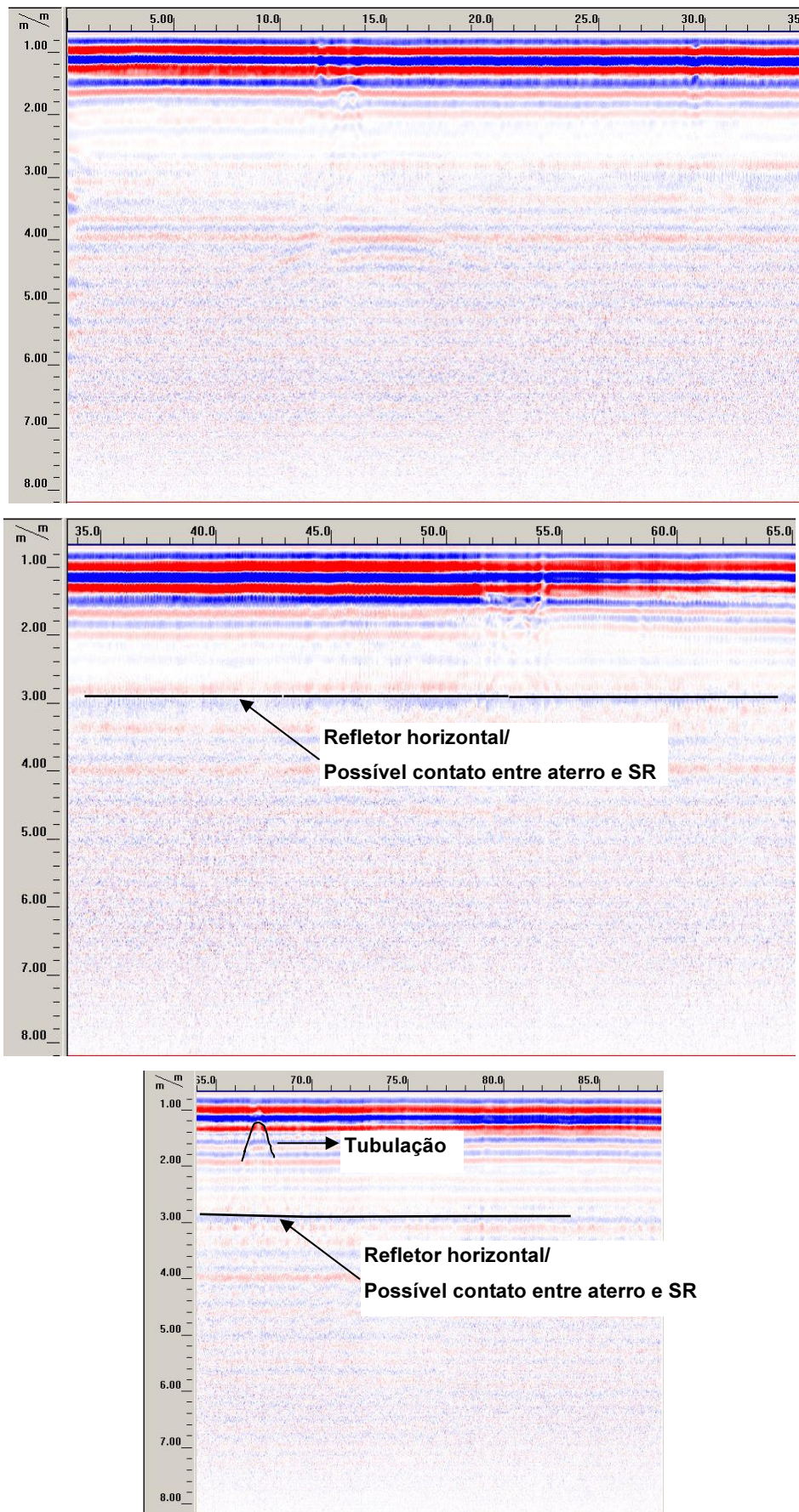


Figura 6.8 – Radargrama no topo do talude

É perceptível neste radargrama algumas regiões onde a atenuação do sinal é mais acentuada, principalmente em seu início. Entretanto, mesmo utilizando os diversos recursos do *software* de processamento dos dados, o *RADAN*[®], não foi possível delimitar uma área em que a atenuação fosse muito significativa e que a amplitude do sinal fosse semelhante à amplitude do sinal onde ocorre a surgência de água.

A segunda aquisição foi realizada próxima ao campo de futebol, na base do talude, conforme pode ser vista sua localização no diagrama apresentado na Figura 6.5. O radargrama processado deste perfil é apresentado na Figura 6.9, no qual é possível perceber claramente algumas faixas de atenuações do sinal do GPR. A diferença de atenuação nítida aos 66m da escala horizontal corresponde à mudança de revestimento da superfície, passando de aterro para grama. Esta maior atenuação observada na parte referente ao revestimento de grama se explica pela maior umidade por ela retida. Também é possível perceber uma ampla faixa de atenuação do sinal aproximadamente uniforme em todo o perfil abaixo de 1,5m de profundidade.

A hipótese de que esta atenuação no sinal do GPR poderia ser proveniente de uma maior salinidade do solo foi descartada, uma vez que os resultados das análises de sais solúveis forneceram valores muito baixos, da ordem de grandeza 0,001cmol/kg, indicando uma presença reduzida de elementos químicos dissolvidos na água intersticial que poderia causar esta atenuação.

De acordo com a inspeção local, toda a região localizada próxima a este perfil se apresenta bem úmida e o furo realizado a trado nesta região, o qual atingiu 1,5m de profundidade, furo 1, mostrou que a partir desta profundidade o solo se encontra saturado. Portanto, é possível que esta atenuação do sinal seja causada pela presença de água.

Entretanto, apesar dessa forte atenuação, é possível notar a presença de um refletor horizontal a aproximadamente 2,60m de profundidade. Em nenhum dos furos realizados nesta região, conseguiu-se atingir tal profundidade. Contudo, é possível supor que este refletor corresponda a um contato existente entre camadas de diferentes propriedades elétricas, podendo ser, por exemplo, um contato de uma camada mais porosa onde se encontra a água, com um material de menor porosidade localizado abaixo desta.

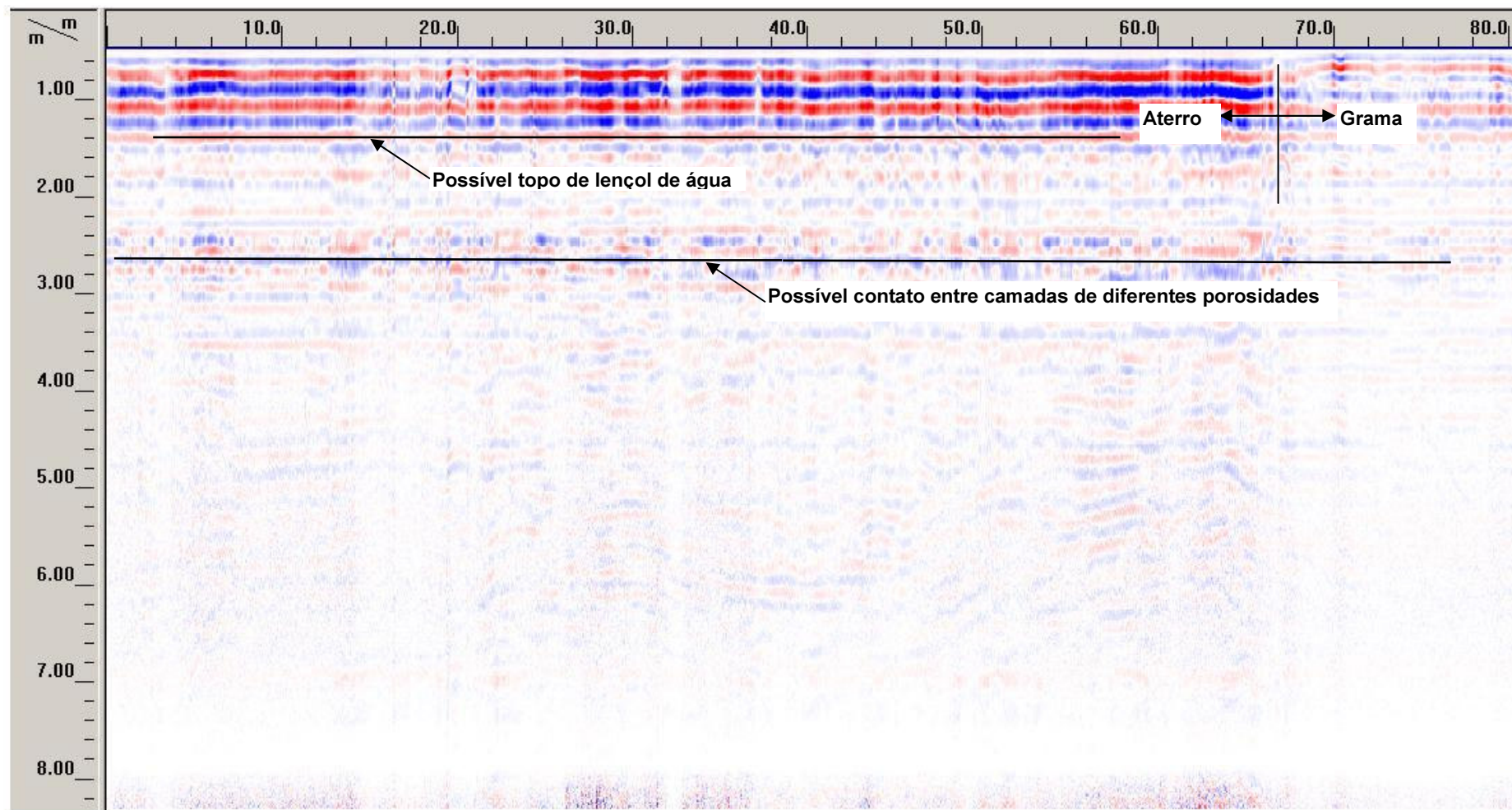


Figura 6.9 – Segundo perfil de GPR, na base do talude, próximo à surgência de água

Levando-se em consideração as informações passadas pela empresa contratada para a construção desta área de lazer sobre a metodologia empregada para compactação e regularização da área, é possível supor que o aterro nesta região tenha sido mal compactado. Esta área está localizada fora da zona de manobra dos caminhões que circulavam na época da construção do PG. Ademais, esta área está localizada muito próxima do pé do talude, o que pode ter dificultado o trabalho da motoniveladora que executou a regularização do aterro nesta região.

Conforme observado nos furos a trado realizados, uma camada menos porosa se encontra no horizonte mais superficial desta região, que por sua vez, pode estar sobrejacente a uma camada mais porosa proveniente da má compactação do aterro, e esta, localizada acima de uma camada menos porosa, contato representado pelo refletor horizontal a 2,60m de profundidade. Esta camada intermediária, mais porosa, pode estar armazenando água proveniente de vazamentos da rede de água do PG, uma vez que esta região se constitui numa bacia que pode receber contribuição de 3 dos seus 4 lados adjacentes, conforme pode ser observado na Figura 6.2.

Uma outra hipótese possível, concomitante ou não com a primeira hipótese levantada, está baseada nas informações passadas por esta empresa sobre a existência de uma nascente de água descoberta antes da construção da área de lazer. Como esta surgência só foi percebida após a construção do PG, é possível que a carga desta construção tenha propiciado seu aparecimento, sendo, portanto, este “bolsão” de água, correspondente a um aquífero confinado que pode ou não estar recebendo a contribuição de águas procedentes de vazamentos. Apesar de uma ligeira aleatoriedade nos resultados das análises químicas, observa-se que os resultados da condutividade e pH nas amostras dos furos 2 e 4 estão muito próximos dos valores normalmente registrados para águas de nascentes, valores de pH próximos de 6, conforme sugere Vaitsman (2005).

Com a finalidade confirmatória da existência deste “bolsão” de água, foram feitas mais duas aquisições de GPR. Uma delas, adquirida na rua de acesso à área de lazer e, a outra, adquirida na transversal do perfil 2, entre o campo de futebol e a casa de lazer, respectivamente perfis 3 e 4, que podem ser visualizados na Figura 6.5. Os respectivos radargramas processados são apresentados nas Figura 6.10 e 6.11.

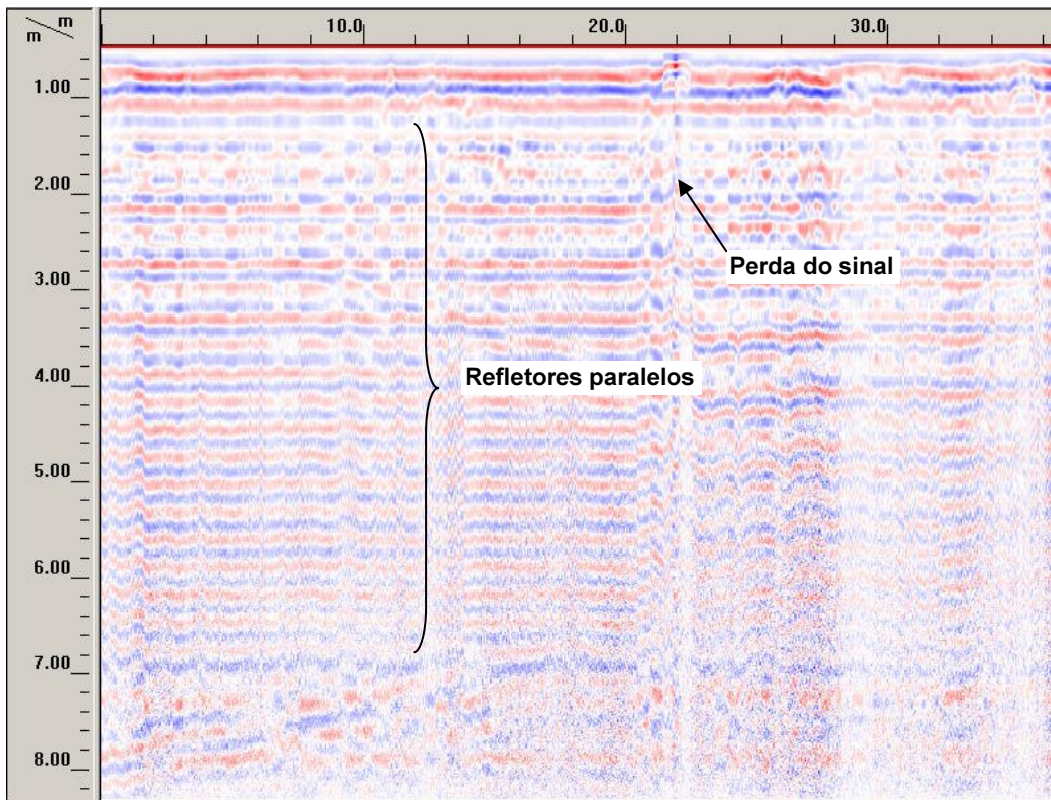


Figura 6.10 – Terceiro perfil de GPR adquirido na rua de acesso à área de lazer

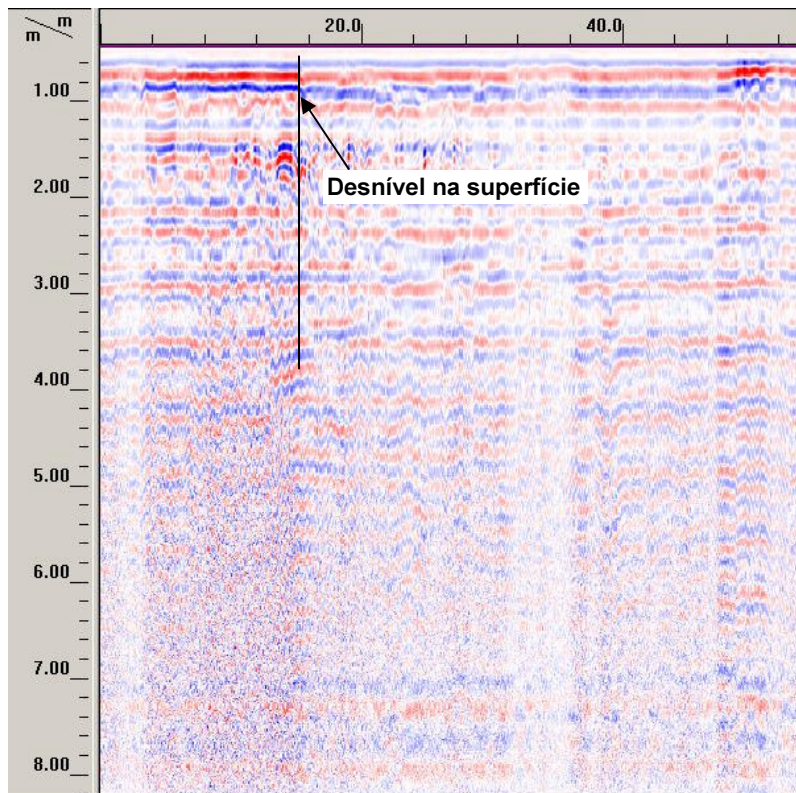


Figura 6.11 – Quarto perfil de GPR adquirido entre o campo de futebol e a casa de lazer

Em ambos os perfis apresentados não é perceptível a forte atenuação apresentada no perfil 2, correspondente à região de interesse, tampouco o refletor horizontal.

A aparência do sinal também se mostra diferente nestes perfis, mais nitidamente no perfil 3, quando comparado ao perfil traçado próximo ao local de surgência de água. Aparência de refletores paralelos superpostos pode ser decorrente das camadas de compactação que foram sendo gradativamente construídas ao longo do processo de deposição do material excedente da escavação seguido da compactação provocada pelo tráfego dos caminhões. Esta aparência de reflexão se assemelha muito aos perfis adquiridos sobre pavimentos que passaram por compactação controlada, como os apresentados em Grote *et al.* (2005).

Em novembro de 2004, após iniciados os trabalhos de pesquisa, a equipe do Globo encontrou um vazamento na portaria do Parque Gráfico, que depois de resolvido, ocasionou uma redução na conta de água do PG quase equivalente ao aumento anteriormente registrado. Analisando os resultados encontrados e sabendo da existência deste vazamento, supõe-se que o local onde ocorre a surgência de água pode estar ligado a um aquífero confinado que pode ou não estar recebendo contribuição de pequenos vazamentos da rede.

6.5. Considerações finais

A investigação realizada à procura de vazamentos na rede hidráulica do Parque Gráfico do Jornal O Globo sugeriu a importância da execução de sondagens exploratórias para aumentar a confiabilidade da interpretação dos resultados. Embora o GPR identifique anomalias de sub-superfície, a exata identificação de feições geológicas (*e.g.*, posicionamento do nível d'água, contatos litológicos) só é possível por meio da realização de sondagens.

O emprego do TDR na determinação da constante dielétrica permite a determinação, com um grau de exatidão adequada, das profundidades das feições geológicas identificadas.

Além disto, a coleta de amostras para análises de propriedades físico-químicas (*e.g.*, teor de umidade, pH, condutividade elétrica, teor de sais solúveis) auxiliou a interpretação dos resultados das sondagens geofísicas.

A técnica *common offset* (CO) empregada com as antenas blindadas de 250MHz permitiu delimitar algumas regiões de atenuação do sinal do radar que aparentemente estão ligadas a regiões do solo que se encontram com maiores teores de umidade/porosidade.

Entretanto, a possibilidade da existência de um aquífero confinado não foi descartada. Os resultados das análises químicas e as informações coletadas junto à direção do Parque Gráfico sugerem que a surgência de água próxima ao campo de futebol pode estar relacionada à sua existência.

7

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

A partir da análise dos levantamentos de campo efetuados com o Georadar (GPR), pode-se tirar algumas conclusões a respeito dos resultados obtidos. Primeiramente, é importante ressaltar que, embora a aquisição de dados do GPR seja bastante simples, o mesmo não se pode dizer de sua interpretação. É necessário que o usuário dessa ferramenta tenha um conhecimento dos princípios físicos e matemáticos do equipamento e, mais que isso, deve estar ciente dos objetivos do levantamento e deve ter conhecimento sobre as propriedades elétricas do alvo e do meio encaixante. A experiência demonstra que quanto maior o conhecimento das propriedades do solo, maiores as probabilidades de sucesso nos resultados do levantamento efetuado com o Georadar. O uso de outras fontes de informações geológicas e geofísicas que complementem os dados adquiridos pelo GPR aumenta a confiabilidade da interpretação dos dados, além de garantir um bom uso desta metodologia.

Nesta pesquisa, o uso do TDR para a medição da constante dielétrica do solo, possibilitou determinar com maior exatidão as profundidades em que algumas anomalias ocorriam. Conforme dito anteriormente, o uso de ferramentas que possibilitam um maior conhecimento das propriedades do solo contribui para os resultados obtidos com a técnica GPR.

No que diz respeito à aplicabilidade do método GPR no conhecimento da sub-superfície, pode-se concluir que o GPR é um método eficaz na detecção de contrastes bruscos. Como já vem sendo mundialmente reconhecido e pôde ser comprovado com os resultados obtidos na base de combustíveis em São Paulo e na indústria mecânica em Nova Friburgo, os contatos entre areia e argila ou ainda a existência de tubulação enterrada foram detectados, devido a uma diferença significativa nas propriedades elétricas destes materiais, capaz de provocar uma forte impedância elétrica. Além disto, também pôde ser comprovada a eficiência do GPR na determinação da profundidade do lençol freático, conforme foi constatado na maioria dos trabalhos aqui apresentados.

No que diz respeito à aplicabilidade do método GPR na detecção de contaminação por hidrocarbonetos, ainda faltam dados mais conclusivos para atestar sua eficiência para este tipo de aplicação. A falta de informações sobre a escória encontrada na base de combustíveis em Santos Dumont dificulta a interpretação dos resultados obtidos, suscitando a dúvida sobre a correspondência entre a “zona de sombra” encontrada nos perfis GPR e a contaminação por hidrocarbonetos.

Muitos trabalhos têm confirmado a eficiência do método GPR na detecção de hidrocarbonetos, como o realizado por Sauck *et al.* (1998), onde a contaminação é identificada como uma “zona de sombra”, em que a amplitude do sinal do radar é atenuada, abaixo do lençol freático, devido à alta condutividade elétrica da água associada à presença de ácidos provenientes da atividade microbiana. Porém, ainda não existe um consenso na comunidade científica a respeito desta resposta do GPR, corroborado por pesquisas recentes em âmbito laboratorial cujos resultados estão descritos em Nunes (2002).

Como sugestão para atestar a validade do uso do GPR na detecção de plumas de hidrocarbonetos, propõe-se a realização de ensaios controlados em campo com conhecimento das propriedades físicas, químicas bem como o papel da atividade microbiana. No Brasil, já existem experimentos, em escala piloto, na Ilha de Santa Catarina, onde a degradação natural é monitorada em derrames controlados de hidrocarbonetos (Corseuil, 2000). Este estudo está sendo realizado há mais de 5 anos e seria interessante utilizar um trabalho como este para aplicar a metodologia GPR. Vale ressaltar que a técnica geofísica deveria ser aplicada desde o início dos derramamentos para verificar as respostas do GPR ao longo do tempo.

Finalmente, no que diz respeito à aplicabilidade do método GPR na detecção de vazamentos de água em sub-superfície, também se faz necessária a realização de uma maior quantidade de estudos para comprovar a eficiência da técnica. Pesquisas têm sido desenvolvidas com este intuito, dentre elas pode-se citar o estudo realizado por Prado *et al.* (2003), que obteve resultados ambíguos no que diz respeito à eficiência do GPR na detecção de vazamentos. Neste caso, foram realizados levantamentos WARR (*Wide Angle Reflection and Refraction*) e CO (*common offset*) utilizando antenas não blindadas. As análises de velocidade da propagação da onda no meio permitiram a identificação de possíveis pontos de

vazamento, uma vez que zonas saturadas apresentavam menores valores de velocidade, mapeando-se assim os locais que apresentavam maiores valores de umidade.

A pesquisa realizada no Parque Gráfico do Jornal O Globo forneceu resultados não tão específicos a respeito dos possíveis pontos de vazamento da rede, devido a alguns fatores, dentre eles, as propriedades dos solos e a possibilidade da existência de um aquífero confinado. Os resultados das análises químicas e as informações coletadas junto à direção do Parque Gráfico sugerem que a surgência de água próxima ao campo de futebol pode estar relacionada à existência deste aquífero confinado.

Nos trabalhos realizados no PG, seria interessante a realização de alguns furos de sondagem para determinar a profundidade do lençol freático na área de lazer. Ademais, outras análises químicas, *e.g.* complexo sortivo, poderiam auxiliar na interpretação dos resultados. Entretanto, deve-se lembrar que a área estudada corresponde a um aterro constituído de materiais variados que dificultam qualquer interpretação dada a sua heterogeneidade.

Por último, sugere-se a realização de pesquisas que aliem condições de campo e laboratório. Pesquisas em ambiente de campo com a realização de amostragens e sondagens auxiliariam a interpretação dos dados obtidos com a geofísica, promovendo uma filtragem das mais variadas hipóteses levantadas. Um estudo em escala de laboratório, onde a natureza dos solos é conhecida, reproduzindo as condições observadas em campo, seria mais uma forma de comprovar os resultados obtidos, caracterizando mais precisamente a resposta do radar em diferentes situações, além de contribuir para a criação de um banco de dados. Neste sentido, dois tanques capazes de serem empregados nestes estudos, vistos na Figura 7.1, já se encontram operativos em instalações do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente.



Figura 7.1– Modelo desenvolvido para estudos com o GPR em escala de laboratório

Referências bibliográficas

AL-FARES *et al.* (2002), **Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area with ground penetrating radar.** Journal of Applied Geophysics, Vol. 51, pp. 97-106.

ANNAN, A. P., COSWAY, S. W. (1992), **Ground penetrating radar survey design.** Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Vol. 2, pp. 329-352.

ANNAN, A. P., COSWAY, S. W., REDMAN, J.D. (1991), **Water table detection with ground penetrating radar.** International Congress of Society of Exploration Geophysical, n° 61, pp. 494-496.

AQUINO, W. F., DEHAINI, J., MENDES, J. M. B. (1998), **Geo-radar para detecção de contaminação por hidrocarboneto.** Anais do II Workshop de Geofísica Aplicada. Rio Claro, S.P.

ARANHA *et al.* (2002), **The use of GPR for characterizing underground weathered profiles in the sub-humid tropics.** Journal of Applied Geophysics, Vol. 49, pp. 195-210.

ARARUNA Jr *et al.* (2004), **Relatório desenvolvido pelo Núcleo de Geotecnia Ambiental da PUC-Rio.**

ARARUNA Jr *et al.* (2005), **Relatório desenvolvido pelo Núcleo de Geotecnia Ambiental da PUC-Rio.**

ASTM International. Designation D 6780-02, **Standard Test Method for water content and density of soil in place by TDR.**

ASTM. Designation D 6565-00, **Standard Test Method for determination of water (moisture) content of soil by the TDR method.**

ATEKWANA, E. A., SAUCK, W. A., WERKEMA JR, D. D. (2000), **Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site.** Journal of Applied Geophysics, Vol. 44, pp. 167-180.

BENSON, A. K. (1995), **Applications of ground penetrating radar in assessing some geological Hazards: examples of groundwater contamination, faults, cavities.** Journal of Applied Geophysics, Vol. 33, pp. 177-193.

BERES, M., HAENI, F. P. (1991), **Application of ground penetrating radar methods in hidrogeologic studies.** Ground Water, Vol. 29, n° 3, pp. 375-386.

BIRKEN, R., VERSTEEG, R. (2000), **Use of four-dimensional ground penetrating radar and advanced visualization methods to determine subsurface fluid migration**. Journal of Applied Geophysics, Vol. 43, pp. 215-226.

BOTELHO, M. A. B., MACHADO, S. L., DOURADO, T. C., AMPARO, N. S. (2003), **Experimentos laboratoriais com GPR (1GHz) em corpos arenosos para analisar a influência da água e de hidrocarbonetos na sua velocidade de propagação**. 8º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica. SBGF.

CARCIONE, J. M., MARCAK, H., SERIANI, G., PADOAN, G. (2000), **GPR modeling study in a contaminated area of Krzywa Air Base (Poland)**. Geophysics, Vol. 65, n° 2, pp. 521-525.

CARCIONE, J. M., SERIANI, G. (2000), **An electromagnetic modelling tool for the detection of hydrocarbons in the subsoil**. Geophysical Prospecting, Vol. 48, pp. 231-256.

CASTRO, D. L., BRANCO, R. M. G. C. (2003), **4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history**. Journal of Applied Geophysics, Vol. 54, pp. 127-144.

CHICOTA, R. (2003), **Avaliação no campo de um TDR segmentado para determinação da umidade do solo**. Dissertação de mestrado em Agronomia, Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo.

CORSEUIL, H. (2000), **Results of a natural attenuation field experiment for an ethanol-blended gasoline spill**. Proceedings of the 2000 petroleum hydrocarbon and organic chemicals in ground water, Anaheim, CA, USA, pp. 24-31.

DANIELS, D. J., ROBERTS, R., VENDL, M. (1995), **Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants**. Journal of Applied Geophysics, Vol. 33, pp. 195-207.

DAVIS, J. L., ANNAN, A. P. (1989), **Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy**. Geophysical Prospecting, Vol. 37, pp. 531-551.

DOMINIC, D. F., EGAN, K., CARNEY, C., WOLFE, P. J., BOARDMAN, M. R. (1995), **Delineation of shallow stratigraphy using ground penetrating radar**. Journal of Applied Geophysics, Vol. 33, pp. 167-175.

DOOLITTLE, J. A., COLLINS, M. E. (1995), **Use of soil information to determine application of ground penetrating radar**. Journal of Applied Geophysics, Vol. 33, pp. 101-108.

ELIS, V. R. (2004), **Geofísica aplicada ao estudo da poluição de solos e águas subterrâneas**, VI Escola de Verão de Geofísica, 67p.

EPA, **Innovations in site characterization: Geophysical investigation at hazardous waste sites**, Publication EPA, EPA/542/R/00/03, 2000, 158 p.

FINE, P., GRABER, E. R., YARON, B. (1997), **Soil interactions with petroleum hydrocarbons: Abiotic processes**. Journal of Applied Geophysics, Vol. 10, pp. 133-153.

GRANDJEAN, G., GOURRY, J. C., BITRI, A. (2000), **Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: study on a test site**. Journal of Applied Geophysics, Vol. 45, pp. 141-156.

GRASMUECK, M. (1996), **3-D ground-penetrating radar applied to fracture imaging in gneiss**. Geophysics, Vol. 61, n^o 4, pp. 1050-1064.

GREENHOUSE, J., BREWSTER, M., SCHNEIDER, G., REDMAN, D., ANNAN, P., OLHOEFT, G., LUCIUS, J., SANDER, K., MAZZELLA, A. (1993), **Geophysics and solvents: the Borden experiment**. The Leading EDGE, pp. 261-267.

GREENHOUSE, J., GUDJURGIS, P., SLAINE, D., (1995), **Applications of surface geophysics to environmental investigations**. Reference notes for an EEGS Short Course, 173p.

GROTE *et al.* (2005), **Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques**. Journal of Applied Geophysics, Vol. 57, pp. 129-153.

HUBBARD, S., GROTE, K., KOWALSKY *et al.* (2003), **High-Resolution estimation of near-subsurface water content using surface GPR ground wave information**.

JUNIOR, G.O.J. (2003), **Desempenho do reflectômetro no domínio do tempo na detecção de variações de umidade do solo**. Dissertação de mestrado em Agronomia, Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo.

KIM, C., DANIELS, J. J., GUY, E. D., RADZEVICIUS, S. J., HOLT, J. (2000), **Residual Hydrocarbons in a Water-Saturated Medium: A detection strategy using ground penetrating radar**. Environmental Geosciences, Vol. 7, pp. 169-176.

KRUK, A. V., SLOB, E. C. (2004), **Reduction of reflections from above surface objects in GPR data**. Journal of Applied Geophysics, Vol. 55, pp. 271-278.

Manual de métodos de análise de solo / Centro Nacional de Pesquisa de Solos – Rio de Janeiro, 1997, 212 p.

MARTINEZ, A., BYRNES, A. P. (2001), **Modeling dielectric-constant values of geologic materials: An aid to ground-penetrating-radar data collection and interpretation.** Earth Sciences, Bulletin 247, part 1.

MELLETT, J. S. (1995), **Ground penetrating radar applications in engineering environmental, management and geology.** Journal Applied Geophysics, Vol. 33, pp. 157-166.

NABUCO, P. C. (2004). **Comunicação pessoal.**

NUNES, C. M. F. (2002), **Aplicações do GPR (Ground Penetrating Radar) na caracterização de perfis de alteração de rochas gnáissicas do Rio de Janeiro,** dissertação de mestrado, DEC, PUC-Rio, RJ.

OLHOEFT, G. R. (1984), **Application and limitations of ground penetrating radar.** Annual International Meeting and Exploration of Society of Exploration Geophysicists, Atlanta, n^o 54, pp. 147-148.

OLHOEFT, G. R. (1996), **Application of ground penetrating radar.** International Conference on Ground penetrating Radar, 6th. Sendai, Japan, pp. 1-3.

ORLANDO, L., MARCHESI, E. (2001), **Georadar as a tool to identify and characterize solid waste dump deposits.** Journal of Applied Geophysics, Vol. 48, pp. 163-174.

ÖSTERREICHER-CUNHA, P. (2004), **Monitoramento de bioventilação em solo indeformado contaminado com gasolina e etanol.** Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

POLIVAVOV, H. (1998), **Caracterização química, mineralógica, física e geotécnica de perfis de intemperismo desenvolvidos de gnaisses no Rio de Janeiro.** Tese de doutorado em geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

PORSANI, J. L. (1999), **Ground penetrating radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado – SP.** Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro – SP. 145 p.

PRADO *et al.* (2003), **Estudos com GPR (Ground Penetrating Radar) visando a detecção de vazamentos da rede hidráulica em subsuperfície na cidade de São Paulo.** 8^o Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica. SBGF.

Radan 6 for Windows 2000 and XP Professional (2004), **User's Manual.** Geophysical Survey Systems, Inc.

RAMAC/GPR (1998), MalaGeoscience.

REDMAN, J. D., DERYCK, S. M., ANNAN, A. P. (1991), **Detection of LNAPL pools with GPR: theoretical modelling and surveys of a controlled spill**. Sensors & Software, Inc (Internal Report, PEMD # 155). 12 p.

REPPERT, P. M., MORGAN, F. D., TOKSÖZ, M. N. (2000), **Dielectric constant determination using ground-penetrating radar reflection coefficients**. Journal of Applied Geophysics, Vol. 43, pp. 189-197.

SAARENKETO, S. (1998), **Electrical properties of water in clay and silty soils**. Journal of Applied Geophysics, Vol. 10, pp. 73-78.

SANTAMARINA, J. C. (2001), **Soils and waves**. John Wiley and Sons, 488 p.

SAUCK, W. A. (2000), **A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments**. Journal of Applied Geophysics, Vol. 44, pp. 151-165.

SAUCK, W. A., ATEKWANA, E. A., NASH, M. S. (1998), **High Conductivities Associated with an LNAPL Plume Imaged by Integrated Geophysical Techniques**. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol.2, n^o 3, pp. 203-212.

SCAIFE, J. E., ANNAN, A. P. (1991), **Ground Penetrating Radar: a powerful, high resolution tool for mining engineering and environmental problems**. Sensors & Software, Inc (Internal Report, PEMD # 59). 24 p.

SCHELLENTRAGER, G. W., DOOLITTLE, J. A., CALHOUN, T. E., WETTSTEIN, C. A. (1988), **Using ground penetrating radar to update soil survey information**. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 52, pp. 746-752.

SILVA *et al.* (2004), **Resistivity and ground-penetrating radar images of fractures in a crystalline aquifer: a case study in Caiçara farm – NE Brazil**. Journal of Applied Geophysics, Vol. 56, pp. 295-307.

SILVA, E. L., GERVÁSIO, E. S. (1999), **Uso do instrumento TDR para determinação do teor de água em diferentes camadas de um latossolo roxo distrófico**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Vol. 3, n^o 3, pp.417-420.

SUN, J., YOUNG, R. A. (1995), **Recognizing surface scattering in ground penetrating radar data**. Geophysics, vol. 60, n^o 5, pp. 1378-1385.

TECNOSLO (1997), **Relatório Geotécnico para Projeto do Parque Gráfico do Jornal O Globo**.

TOMMASELLI, J. T. G., BACCHI, O. O. S. (2001), **Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, Vol.36, pp. 1145-1154.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L., ANNAN, A. P. (1980), **Eletromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines**. Water Resources Research, Vol. 16, n^o 3, pp. 574-582.

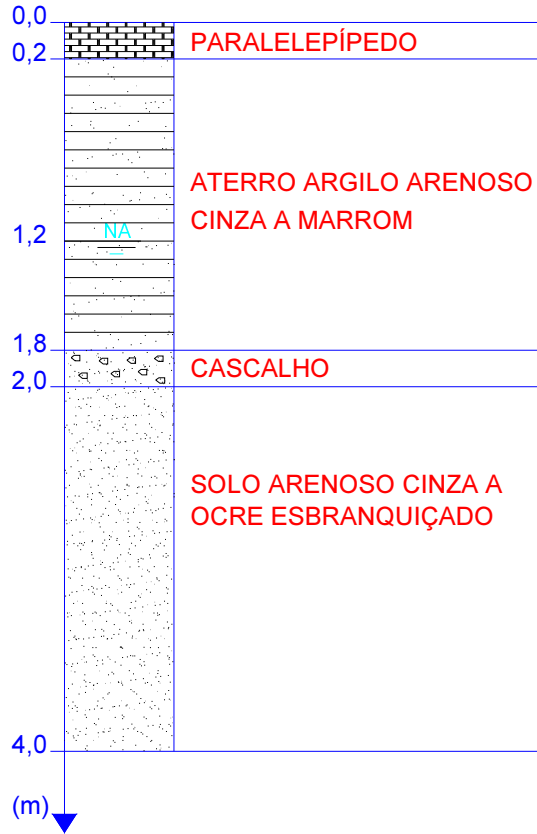
VAITSMAN, D. S. (2005). **Comunicação pessoal**.

WARD, S. H., HOHMANN, G. W. (1987), **Electromagnetic theory for geophysical applications**. Investigations in Geophysics, no 3. Eletromagnetic Methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, Vol. 1, pp. 131-311.

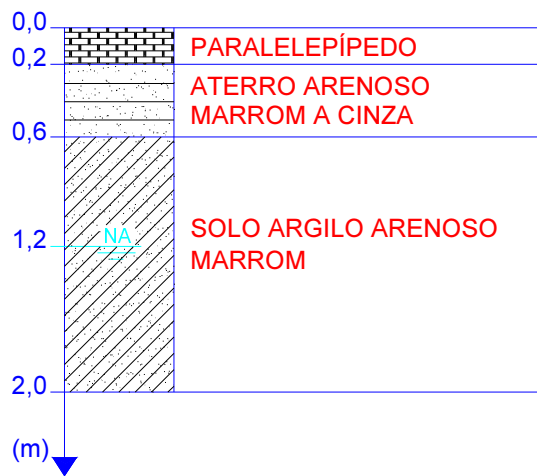
Anexos

Anexo A – Sondagens na base de combustíveis em SP/SP


SONDAGEM C108



SONDAGEM C137



Anexo B.1 – Sondagens em base de combustíveis SD/MG

 Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro Departamento de Engenharia Civil										
SP - FUR0 No. 001					COTA: -					
PENETRACAO		CONSISTENCIA				COTA EM RELACAO AO RN	AMOSTRA	PROFUN-DIDADE DA CAMADA (m)	REVESTIMENTO Ø = 63,5 mm AMOSTRADOR { INTERNO Ø = 34,9 mm EXTERNO Ø = 50,8 mm PESO: 65 kg - ALTURA DE QUEDA: 75 cm	FORAM UTILIZADAS 7,00 METROS DE HASTE
No GOLPES 30 CM		MOLE	MEDIA RIJA	MUITO RIJA	DURA					
No DE GOLPES		GRAFICO				NIVEL DE AGUA			CLASSIFICACAO DO MATERIAL	
1a e 2a	2a e 3a	10	20	30	40					
						N.A.			ATERRO (SAIBRO)	
							0.57		ARGILA SILTOSA VERMELHA	
							0.72		SILTE ARENOSO MARROM DE GRANUL. VARIADA	
							1.05		SILTE ARENOSO COM ESCORIA	
							1.79		SILTE ARENOSO MICACEO - MARROM AVERMELHADO	
							2.42		SILTE ARGILOSO, CDR ESCURA (FORTE ODDOR DE HIDROCARBONETO DE PETRÓLEO)	
							3.54		SILTE ARGILOSO, CDR ESCURA (MAT. MICACEO PARCIALMENTE ALTERADO)	
							4.03		ARGILA SILTOSA, CDR ESCURA	
							5.44		PEDREGULHO (MAT. ROCHOSO GRANUL. DIVERSIFICADA)	
							5.84		ARGILA SILTOSA, CDR ESCURA	
							7.00		LIMITE DA SONDAGEM	
COORDENADAS: (UTM) N = 0650839 E = 7625402										
COMPACIDADE										
FDBA	FOLCO	COMPACTA	MEDIANAMENTE	COMPACTA	COMPACTA					
PROFUNDIDADE DO NIVEL D'AGUA N.A. - 2.06 m										
ESCALA		1:100		DATA		29/06/2004		DESENHO No.		SD-01
DESENHISTA		MICHELLE SOUZA		ENGENHEIRO		JOSÉ TAVARES ARARUNA JUNIOR		REFERENCIA		
CLIENTE DÍNAMO										
LOCAL SANTOS DUMONT, MG										




Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Departamento de Engenharia Civil

SP - FURTO No. 002		COTA: -	
PENETRACAO No GOLPES 30 CM 1a E 2a PENETRACOES 2a E 3a PENETRACOES		CONSISTENCIA MOLE MEDIA RUA MUITO RUA DURA	
No DE GOLPES 1a e 2a 2a e 3a		GRAFICO 10 20 30 40	
COTA EM RELACAO AD RN		NIVEL DE AGUA	
AMOSTRA		PROFUN- DIDADE DA CAMADA (m)	
REVESTIMENTO Ø = 63,5 mm AMOSTRADOR { INTERNO Ø = 34,9 mm EXTERNO Ø = 50,8 mm PESO: 65 kg - ALTURA DE QUEDA: 75 cm		FORAM UTILIZADAS 7,00 METROS DE HASTE	
CLASSIFICACAO DO MATERIAL			
PISO DE CONCRETO ASFÁLTICO			
0,40 LIMITE DA SONDAGEM			
COORDENADAS: (UTM) N = 0650913 E = 7625405			
ESCALA 1:200		DATA 29/06/2004	
DESENHISTA MICHELLE SOUZA		DESENHO No. SD-02	
CLIENTE DINAMO		ENGENHEIRO JOSÉ TAVARES ARARUNA JUNIOR	
LOCAL SANTOS DUMONT, MG			
PROFUNDIDADE DO NIVEL D'ÁGUA N.A. - NÃO ALCANÇADO			



Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Departamento de Engenharia Civil

SP - FURTO No. 003		COTA: -	
PENETRACAO No GOLPES 30 CM 1a E 2a PENETRACOES 3a E 3a PENETRACOES		CONSISTENCIA MOLE MEDIA RILJA MUITO RILJA DURA	
No DE GOLPES 1a e 2a 2a e 3a		COTA EM RELACAO AD RN NIVEL DE AGUA	
10 20 30 40		AMOSTRA	
GRAFICO 10 20 30 40		PROFUN- DIDADE DA CAMADA (m)	
COMPACIDADE EDFA POUCO COMPACTA MEDIANAMENTE COMPACTA COMPACTA		REVESTIMENTO Ø = 63,5 mm AMOSTRADOR { INTERNO Ø = 34,9 mm EXTERNO Ø = 50,8 mm PESO: 65 kg - ALTURA DE QUEDA: 75 cm FORAM UTILIZADAS 7,00 METROS DE HASTE	
CLASSIFICACAO DO MATERIAL		PISO DE CONCRETO ASFALTICO	
LIMITE DA SONDAGEM		0,40	
COORDENADAS: (UTM) N = 0650893 E = 7625403		ESCALA 1:200 DATA 29/06/2004 DESENHO No. SD-03 REFERENCIA	
DESENHISTA MICHELLE SOUZA ENGENHEIRO JOSE TAVARES ARARUNA JUNIOR		CLIENTE DINAMO	
LOCAL SANTOS DUMONT, MG		N.A. - NÃO ALCANÇADO	

		Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro						
		Departamento de Engenharia Civil						
SP - FURTO No. 004				COTA: -				
PENETRACAO		CONSISTENCIA		COTA EM RELACAO AO RN	AMOSTRA	PROFUN- DIDADE DA CAMADA (m)	REVESTIMENTO Ø = 63,5 mm	FORAM UTILIZADAS 7,00 METROS DE HASTE
No GOLPES 30 CM 1a E 2a PENETRACOES 2a E 3a PENETRACOES		MOLE MEDIA RILJA MUITO RILJA	JURA				AMOSTRADOR { INTERNO Ø = 34,9 mm EXTERNO Ø = 50,8 mm	
No DE GOLPES 1a e 2a 2a e 3a		GRAFICO 10 20 30 40		NIVEL DE AGUA	AMOSTRA	0,40	CLASSIFICACAO DO MATERIAL	
							AREIA SILTOSA MICACEA AMARELO/AVERMELHADA SOLO RESIDUAL COM ESTRUTURA RELIQUIAR	
								COORDENADAS: (UTM) N = 0650894 E = 7625334
		COMPACIDADE						ESCALA 1:200
		EDFA POUCO COMPACTA MEDIANAMENTE COMPACTA COMPACTA						DATA 29/06/2004
								DESENHO No. SD-04
								REFERENCIA
								DESENHISTA MICHELLE SOUZA
								ENGENHEIRO JOSE TAVARES ARARUNA JUNIOR
								CLIENTE DINAMO
								LOCAL SANTOS DUMONT, MG

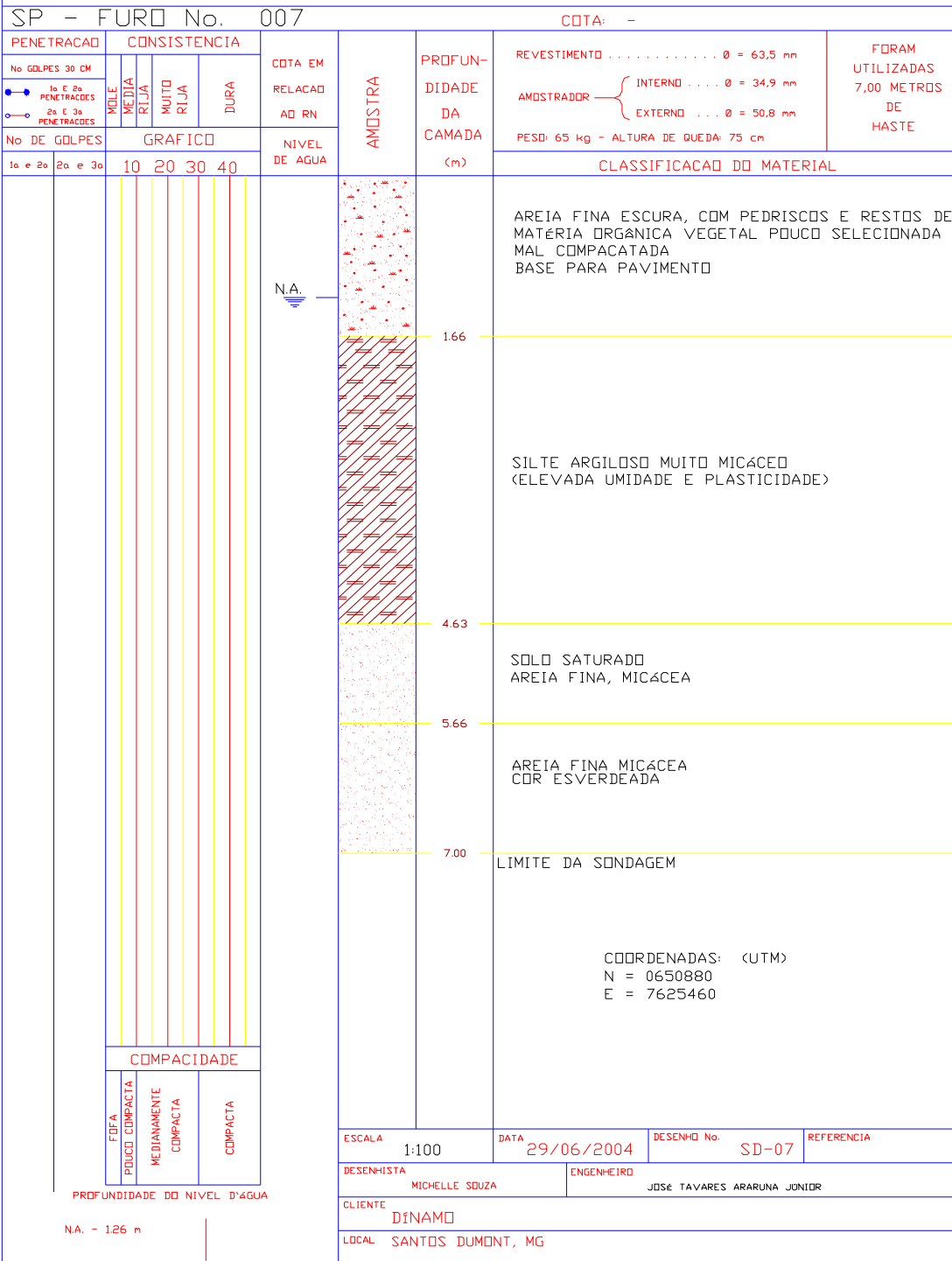
N.A. - NAO ALCANÇADO



Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Departamento de Engenharia Civil

SP - FURO No. 005				COTA: -										
PENETRACAO		CONSISTENCIA		COTA EM RELACAO AO RN	AMOSTRA	PROFUN- DIDADE DA CAMADA (m)	REVESTIMENTO $\varnothing = 63,5 \text{ mm}$	FORAM UTILIZADAS 7,00 METROS DE HASTE						
No GOLPES 30 CM	MOLE MEDIA RIJA MUITO RIJA	JURA	AMSTRADOR { INTERNO $\varnothing = 34,9 \text{ mm}$ EXTERNO $\varnothing = 50,8 \text{ mm}$											
1a E 2a PENETRACAOES							PESO: 65 kg - ALTURA DE QUEDA: 75 cm							
2a E 3a PENETRACAOES	GRAFICO		NIVEL DE AGUA	CLASSIFICACAO DO MATERIAL										
1a e 2a	2a e 3a	10	20	30	40									
							COMPACIDADE							
							F.D.F.A.	POUCO COMPACTA	MEDIANAMENTE COMPACTA	COMPACTA				
							ESCALA		1:100	DATA	29/06/2004	DESENHO No.	SD-05	REFERENCIA
							DESENHISTA		MICHELLE SOUZA		ENGENHEIRO		JOSÉ TAVARES ARARUNA JUNIOR	
							CLIENTE		DÍNAMO					
							LOCAL		SANTOS DUMONT, MG					
							COORDENADAS: (UTM)		N = 0650808		E = 7625402			
							PROFUNDIDADE DO NIVEL D'ÁGUA		N.A. - 2.95 m					

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Departamento de Engenharia Civil



Anexo B.2 – Planilha de cálculo do gradiente hidráulico

Hydraulic Gradient

Gradient Calculation from fitting a plane to as many as fifteen points

$$a x_1 + b y_1 + c = h_1$$

$$a x_2 + b y_2 + c = h_2$$

$$a x_3 + b y_3 + c = h_3$$

...

$$a x_{15} + b y_{15} + c = h_{15}$$

where (x_i, y_i) are the coordinates of the well and
 h_i is the head

$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15$

The coefficients a, b, and c are calculated by a least-squares fitting of the the data to a plane

The gradient is calculated from the square root of $(a^2 + b^2)$ and the angle from the arctangent of a/b or b/a depending on the quadrant

Example Data Set 1
Example Data Set 2
Calculate
Clear

Save Data
Recall Data
Go Back

Site Name

Date
Current Date

Calculation basis

Coordinates

I.D.	x-coordinate	y-coordinate	head <input type="text" value="m"/>
<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0650839"/>	<input type="text" value="7625402"/>	<input type="text" value="2.06"/>
<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="0650808"/>	<input type="text" value="7625402"/>	<input type="text" value="2.95"/>
<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="0650841"/>	<input type="text" value="7625423"/>	<input type="text" value="2.48"/>
<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="0650880"/>	<input type="text" value="7625460"/>	<input type="text" value="1.26"/>

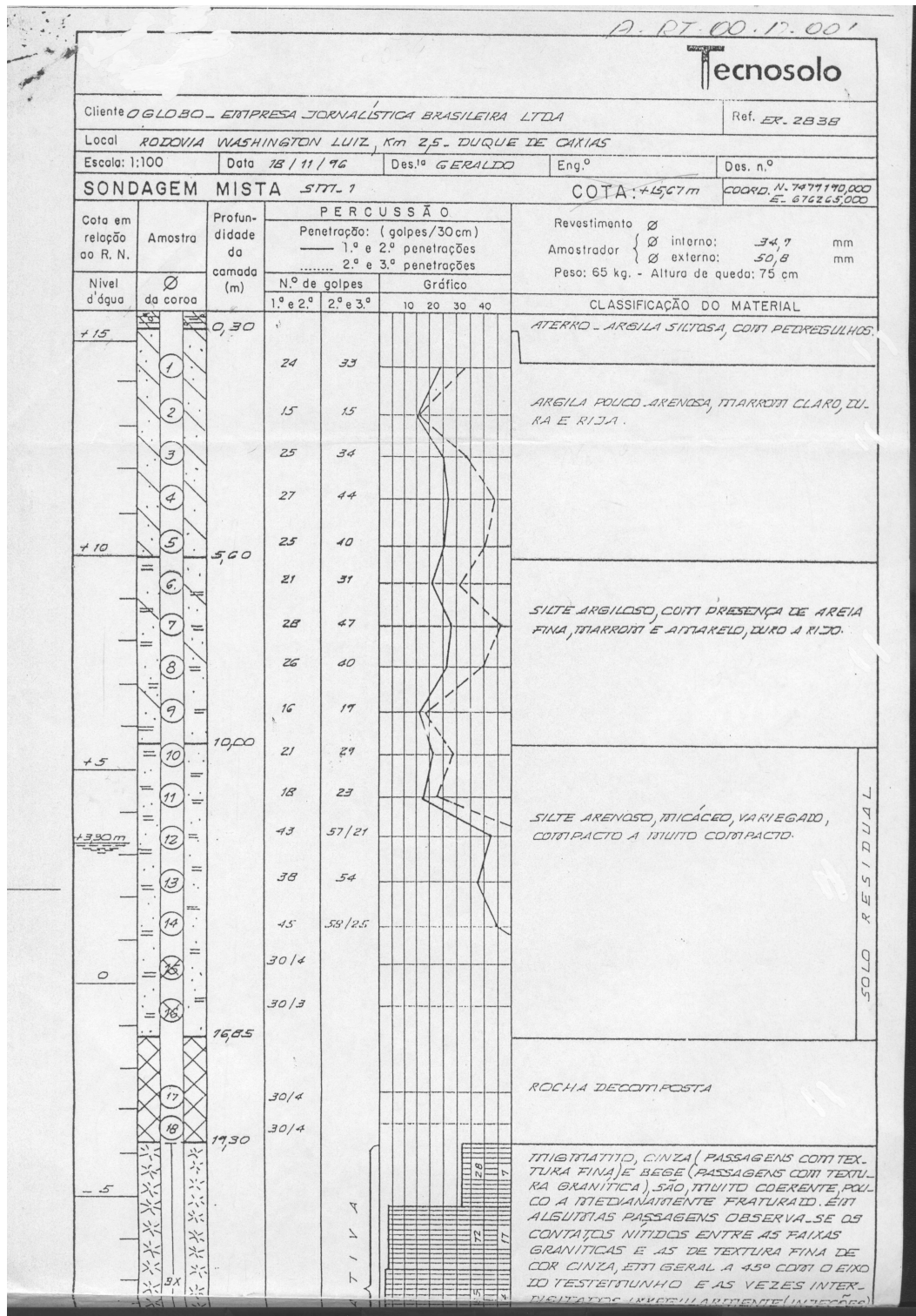
Number of Points Used in Calculation

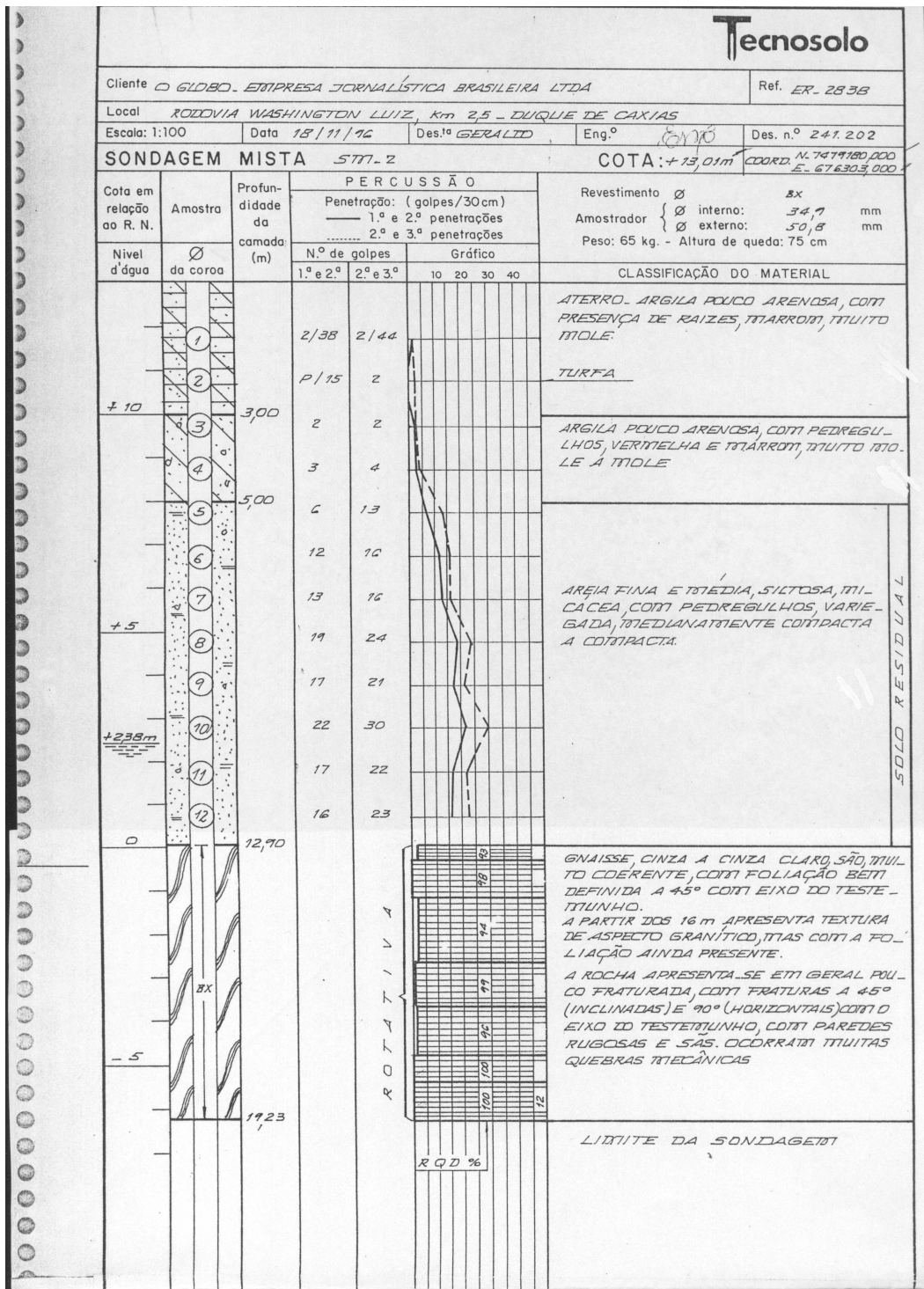
Gradient Magnitude (i)

Flow direction as degrees from North (positive y axis)

Coefficient of Determination (R²)

Anexo C.1 – Sondagens a percussão em PG do Globo





Anexo C.2 – Sondagens a trado em PG do Globo

